

Mitteilungen aus dem  
**Institut für Maschinenwesen**  
der  
Technischen Universität Clausthal  
**Nr. 27**

(November 2002)

**Herausgeber:**

Prof. Dr.h.c. Dr.-Ing. Peter Dietz

**Redaktion und Layout:**

Dr.-Ing. Günter Schäfer

Dipl.-Ing. Hagen Birkholz

**Anschrift:**

Institut für Maschinenwesen  
Technische Universität Clausthal  
Robert-Koch-Str. 32  
D-38678 Clausthal-Zellerfeld

Tel: (0 53 23) 72-22 70

Fax: (0 53 23) 72-35 01

E-Mail: [info@imw.tu-clausthal.de](mailto:info@imw.tu-clausthal.de)

<http://www.imw.tu-clausthal.de>

ISSN 0947-2274

**Titelbild:**

Das Institut für Maschinenwesen führt u.a. Forschungsarbeiten auf dem Rapid Prototyping / Rapid Tooling Gebiet durch. Das Titelbild zeigt die Verfahrenskette von der 3D-Konstruktion bis zum lasergesinterten Bauteil.

## Inhaltsverzeichnis

|   |          |
|---|----------|
| <b>Vorwort.....</b>   | <b>1</b> |
| Dietz, P.:  |          |
| Bachelor, Master, Akkreditierung....  |          |
| Ausweg aus der Bildungskrise oder politische Spinnerei?.....  | 3        |
| <b>Konstruktion und Berechnung von Maschinenelementen</b>   |          |
| Sover, A.:  |          |
| Transportable Maschine zur Anfasung von Rohren zur Schweißnaht-Vorbereitung .....   | 9        |
| Quingsong, H.; Schäfer, G.:   |          |
| Einflüsse der geometrischen Gestaltung von Zahnwellen-Verbindungen mit Evolventen-Zahnprofil<br>auf deren Beanspruchungsverhalten ..... | 15       |
| Mupende, I.; Otto, St.:   |          |
| Die Auslegung einer Seiltrommel im teilplastischen Materialbereich.....   | 19       |
| Mupende, I.; Otto, St.:   |          |
| Festigkeitsnachweis für Flanschkupplungen .....   | 25       |
| Deimel, M.; Grünendick, T.; Dietz, P.:  |          |
| Innenhochdruckgefügte Welle-Nabe-Verbindungen .....   | 29       |
| <b>Konstruktionsmethodik und rechnerunterstützte Produktentwicklung</b>   |          |
| Goltz, M.:  |          |
| Engineering Workflow auf Basis eines objektorientierten Produktmodells .....  | 37       |
| Turan, C.:  |          |
| Ein Anwendungsbeispiel zum Einsatz der Rapid Tooling Prozessketten „Die Fertigung eines Oldtimer-<br>Ersatzteils" .....                 | 45       |
| Tawil, M.:  |          |
| Einsatz von Backpropagation-Netzen zur Abbildung des Rückfederungsverhaltens<br>bei der Feinblechumformung.....                         | 49       |
| Düsing, C.; Kamel, N.:  |          |
| PRIME - Produktwissensmanagement in fertigenden Unternehmen .....   | 55       |
| Goltz, M.; Müller, D.:  |          |
| PDM/PLM - Verwalten ohne Grenzen !? .....   | 59       |
| <b>Experimentelle Methoden und messtechnische Untersuchungen</b>  |          |
| Birkholz, H.  |          |
| Drehzahlprüfung von Cycloid-Getrieben .....   | 67       |
| Birkholz, H.; Garzke, M.; Grünendick, T.; Schäfer, G.:  |          |
| Geschwächte Welle-Nabe-Verbindungen auf dem Prüfstand.....  | 71       |
| Birkholz, H.; Grünendick, T.:   |          |
| Konzeption und Bau einer kompakten und transportablen Schneidmühleneinheit<br>zum Zerkleinern von Hausmüll.....                         | 77       |
| Käferstein, B.:   |          |
| Erfassung vollflächiger Schwingungen von Feinblechstrukturen mit dem Einpunktvibrometer? .....  | 83       |

|  |    |
|--|----|
| Trenke, D.:  |    |
| Verbesserung der Erodierereigenschaften von lasergesinterten Elektroden für das funkenerosive Abtragen ..... | 89 |

### **Maschinenakustik**

|   |     |
|---|-----|
| Nsenga Biansompa, Elie.:  |     |
| Das Gleitlager als Körperschallübertragungselement in Maschinen .....     | 91  |
| Käferstein, B.:   |     |
| Ordnungsanalyse-Toolbox für Matlab .....                                  | 97  |
| Käferstein, B.; Sover, A.:  |     |
| Schwingungsverhalten von Self-Interlocking-Elements .....                 | 103 |
| Backhaus, S.:   |     |
| Inverse Messung von Kräften im akustisch relevanten Frequenzbereich ..... | 105 |

### **Institutsbetrieb**

|   |     |
|---|-----|
| Trenke, D.:   |     |
| Vorstellung der Rapid Tooling Verfahrenskette auf der Hannover Messe Industrie 2002 ..... | 107 |
| Trenke, D.:   |     |
| Technisches Upgrade der Rapid Tooling Anlage EOSINT M 250 .....                           | 109 |
| Wächter, M.:  |     |
| Anforderungen an eine moderne Ingenieurausbildung .....                                   | 113 |
| Müller, D.; Niklaus, J.:  |     |
| Verschlungene Wege - Servermigration von Microsoft® Windows® NT4 auf Windows® 2000 .....  | 119 |
| Schäfer, G.:  |     |
| Nachhaltige internationale Qualifizierung - Doppeldiplom .....                            | 123 |

### **Hochschule und Kontakte**

|  |     |
|--|-----|
| Goltz, M.:   |     |
| Jetzt geht's los - Aktuelle Informationen zum 6. Rahmenprogramm der EU .....   | 127 |
| Schlicht, M.:  |     |
| Für Clausthal in KAIRO .....   | 129 |
| Dzik, S.; Wolny, S.; Siemienieć, A.:   |     |
| Berechnungsmodell der Konstruktion des Schachtfördergefäßes im Lichte der Häufigkeit von Eigenschwingungen, die auf experimentellem Wege und mittels der Berechnungen ermittelt wurden ..... | 131 |

### **Ausstattung etc.**

|   |     |
|---|-----|
| Technische Ausrüstung, Kooperationsangebote und Forschungsschwerpunkte des Institutes ..... | 139 |
| Veröffentlichungen des Institutes seit dem 1.1.1998 .....                                   | 143 |
| Autoren .....   | 149 |

## Vorwort

Das Vogelhaus ist rausgestellt, Ollie Schubert hat die Schneefräse wieder entmottet (und auch schon einmal in Betrieb gehabt), die Pullover der Damen im Sekretariat werden massiver – es wird wieder Zeit für die Institutsmitteilungen!

Die deutschen Hochschulen befinden sich in einem Umbruch und die Technische Universität Clausthal bleibt davon nicht verschont – auch ein weitgehendes Verstecken in den unergründlichen Wäldern des Oberharzes entbindet uns von dieser Reform nicht. Die Politik und vor allem die verantwortlichen Ministerien sind der als Folgen der 68er Ereignisse installierten „verdemokratisierten“ und „vergremsierten“ Hochschulen und der Verantwortung für deren Führung müde geworden und haben unter dem Stichwort „Autonomie für Hochschulen“ ein Hochschulrahmengesetz verfasst, das in diesem Jahre durch ein neues Niedersächsisches Hochschulgesetz detailliert ausgeführt wurde. Noch ist unbekannt, wie durch ein neues Gesetz die jahrelang gepflegten Verkrustungen und Verfilzungen der bestehenden Strukturen aufgelöst werden sollen, und ich sehe auch eine mühsame und frustgeprägte Übergangszeit voraus, in der manche Widerstände nur durch Pensionierung der Reformgegner überwunden werden können.

In der Lehre sieht dieses NHG vor allem die Auflösung der Rahmenrichtlinien für Studien- und Prüfungsordnungen und deren Genehmigungszwang durch das Ministerium vor, ferner werden neue Studiengänge nach dem Bachelor-Master-System mit Akkreditierung eingeführt – ich werde in einem Artikel darüber berichten. In der Hochschulstruktur wird das Rektoratssystem (Sie erinnern sich: Ein Hochschulprofessor spielt zwei Jahre den Rektor im Bergkittel und wird anschließend von seinen Kollegen lebenslang dafür bestraft) durch ein „professionelles“ Präsidium abgelöst und einige Gremien entfernt. Die Hochschule formuliert ihre Ziele mit einem Hochschulrat, der die Gesellschaft repräsentiert, und der Staat zieht sich zurück auf eine allgemeine Überprüfung und die Finanzierung. Im Grunde ist das eigentlich zu begrüßen – der Teufel liegt aber im Detail. Abgesehen von einigen Ministerialbeamten, die sich verzweifeln an ihre Aufgaben klammern (z.B. im zentralisierten Gebäudemanagement der Hochschulen), muss die

Technische Universität Clausthal sich an eine Hochschulleitung gewöhnen, bei der das Präsidium etwa soviel Macht hat wie der Vorstand eines Unternehmens – einschließlich der Gefahr der Fehlplanung und Verantwortung dafür. Jedenfalls haben wir seit Oktober einen (Interims-)Präsidenten, der der alte Rektor ist, und einen hauptamtlichen Vizepräsidenten für den Haushalt, der der alte Kanzler ist. Und ich darf meinen Rektorats-Ruhestand weiter genießen!

Auf die allgemeine Lage bei den Studierendenzahlen hat das wenig Einfluss. Im Zuge allgemeiner Stagnation (in Deutschland sind etwa 30% der Jugendlichen studierwillig mit einem Zuwachs von weniger als 1% pro Jahr) kann die TU Clausthal das Niveau bei den Anfängerzahlen in etwa halten, nicht ganz 80 Neuanmeldungen im Maschinenbau führen jedoch dazu, dass dieser Studiengang wieder der stärkste in unserer Hochschule ist. Dabei stellt das Intensivstudienprogramm des Maschinenbaus einen doch beachtlichen und konstanten Anteil an Studierenden, die erfreulicherweise unter der charmanten Aufsicht von Martina Wächter auch in den höheren Semestern bei der Stange bleiben und sich als arbeitsfähige, interessierte und selbstbewusste Truppe erwiesen haben, die auch die Lehrenden ganz schön fordern – gut so!

Auch der Ausländeranteil ist mittlerweile auf etwa 24% der Studierenden gestiegen, wobei das Institut nicht unbeteiligt ist. Die Aktivitäten von Günter Schäfer um Doppeldiplome in Cardiff und Krakau werden weitergeführt mit Programmen in Oviedo/Valencia in Spanien und Guadalajara in Mexiko, um die sich Steffen Otto besonders kümmert. Neu im Programm ist Moa in Kuba (auch heiß und alkoholreich), das ich im September zu Vorlesungsveranstaltungen zusammen mit Michael Goltz besuchte. Zur Zeit befinden sich drei Kubaner im Institut, die schon auf mehreren Festen dabei waren und die Trinkfestigkeit der Deutschen zutiefst bewundern.

Normalerweise beginne ich mein Mitteilungsvorwort mit dem Institutsumbau – aber da ist im Moment alles still. Zwar hat uns der Blitz im Oktober die Messmaschine und eine Reihe von Computern zerschlagen, zwar haben wir in der alten Spannungsoptik den schon in der letzten Ausgabe



angekündigten funkelnagelneuen Multi-Media-Raum mit Verknüpfungen zum Distance Learning eingerichtet, zwar werden zur Zeit die Glasfaserverkabelungen im gesamten Institut durchgeführt, aber so richtig was, was Dreck und Krach macht und Frau Kurz beeindruckt, findet im Moment nicht statt. Halt – da war doch noch das im letzten Jahr eingeworbene Denkmal! Dank der unerschütterlichen Schaffenskraft von Andreas Rehwagen und seiner Werkstatt prangt die Schlägermühle jetzt frisch gestrichen vor dem Eingang – eingeweiht haben wir sie noch nicht, weil wir uns erst von der Klempschen Doktorfeier erholen müssen.

Dafür hat sich die Mannschaft wieder verändert. Nach erfolgreichem Abschluss ihrer Arbeiten und noch erfolgreicher Abschiedsveranstaltungen sind Nikolai Beisheim und Eric Klemp aus dem Institut ausgeschieden, Wuesal Dschiwischow ist nach Hannover an ein Institut gegangen, Mohamed Tawil und Berthold Käferstein stehen unmittelbar vor dem Abschluss. Neu hinzugekommen sind Alexander Söver und Cem Turan, die insbesondere das Gebiet der rechnerunterstützten Konstruktion und der Berechnungsseite stärken. Unsere reizende Iman Taha ist zwischenzeitlich zurück nach Ägypten, um ihre Masterarbeit zu Ende zu schreiben, sie wird uns sicherlich als wissenschaftliche Mitarbeiterin auf einem Forschungsprojekt wieder beglücken. Und unsere ausländischen Kontakte haben uns insgesamt sieben Gastwissenschaftler aus China, Korea, Kuba und Mexiko beschert, die das Sekretariat zu vielsprachigen Höhenflügen bei der Beschaffung von Zimmern, Bleistiften, Reisearrangements usw. veranlassen.

Das besondere Highlight in diesem Jahr war unser Betriebsausflug nach Ägypten: In einem auf die speziellen Belange des Institutes besonders ausgerichteten Förderprogramm des DAAD durften wir im Oktober unsere freundschaftlichen Beziehungen mit der AinShams-Universität in Kairo austoben, wobei unsere Freundin Iman einschließlich anhängender Familie besonders hilfreich war. Diesmal war auch unser Studentenpfarrer Dr. Schlicht dabei – wir haben ihn zu einem Bericht (Seite 129 ff.) verdonnert.

Den anschließenden Aufsätzen entnehmen Sie, dass unsere Forschungsaktivitäten nicht nur den bisherigen Schwerpunkten treu geblieben sind, sondern dass wir uns auch wieder unserer Aktivitäten in verfahrenstechnischen Anlagen

erinnern. Nach wie vor bilden die Welle-Nabe-Verbindungen einen besonderen Schwerpunkt (Günter Schäfer, Hagen Birkholz, Thorsten Grünendick, Antonio Tajonar, Quingsong Hua und Jörg Niklaus), Ilaka Mupende fasst das Problem des Schrumpfring-Drucklagers in einem neuen Vorhaben an und mit unserer Seiltrommelforschung konnten wir unter Leitung von Steffen Otto auch bei der Industrie große Erfolge erringen. Die Maschinenakustik wird insbesondere auf dem Gebiet der Körperschallübertragung von Berthold Käferstein (Blechstrukturen), Stefan Backhaus und Elie Nsenga Biansompa (Gleit- und Wälzlager) vertreten, wir erwarten hier von einem EU-Antrag eine Ausweitung unserer Kompetenzen. Unser Buch zum lärmarmen Konstruieren verhilft uns in der Industrie zu großem Bekanntheitsgrad und wird in die neue VDI-Richtlinie 3720 als CD komplett übernommen.

Unsere Kompetenz bei den verfahrenstechnischen Maschinen führt zu einem Forschungsvorhaben zur Zerkleinerung von Hausmüll durch mobile Geräte (Thorsten Grünendick und Hagen Birkholz berichten auf Seite 77 ff.). Und die Rapid-Prototyping Maschine verleitet Detlef Trenke und Cem Turan zu neuen Ideen bei der Herstellung von Werkzeugen und Teilen, die in der Industrie viel Anklang finden. Diese Themenstellung ist auch Teil eines Antrages bei der DFG, bei dem wir uns zusammen mit anderen Instituten um die Gestaltung von Bauteilen aus der Kombination von Werkstoffen kümmern, die untereinander inkompatibel sind.

Dies führt uns zu den methodischen Projekten. Auch die Pfeilchen- und Kästchenmaler haben wieder Auftrieb. Michael Goltz berichtet über die Einbindung des Produktmodells in den Workflow der Entwicklung, Carsten Düsing schlägt sich mit dem Problem des Produktwissensmanagements herum und Dirk Müller kämpft um die Datenverwaltung in Konstruktion und Fertigung. Das Projekt des Rückfederungsverhaltens von Blechteilen (Mohamed Tawil) ist erfolgreich abgeschlossen und strebt nun eine neue Phase in Zusammenarbeit mit der Industrie an.

Wie in jedem Jahr sollen die Institutsmitteilung in lockerer Folge von unseren Aktivitäten berichten, Ihnen die „Wir leben noch“ – Botschaft übermitteln und Sie anregen uns wieder einmal zu besuchen und/oder mit uns interessante Aufgaben zu besprechen. In diesem Sinne wünsche ich Ihnen eine entspannte Lektüre bei Bratapfel und

Glühwein, aber auch sonst ein erfreuliches  
Jahresende und ein erfolgreiches neues Jahr, in  
dem wir uns vielleicht wiedersehen.

Clausthal, im November 2002

A handwritten signature in black ink, consisting of a stylized 'K' followed by a horizontal line extending to the right.

## **Bachelor, Master, Akkreditierung...: Ausweg aus der Bildungskrise oder politische Spinnerei?**

Dietz, P.

*Im Rahmen der europäischen Zusammenarbeit und begleitet von neuen politischen Ideen in nationalem Rahmen findet zur Zeit eine tiefgreifende Veränderung des deutschen Hochschulwesens statt. Dies hat Auswirkungen auch auf die Ingenieurwissenschaften und auch auf die Struktur unserer alma mater. Als Mitglied des Deutschen Akkreditierungsrates verfüge ich zur Zeit über Erfahrungen, deren Veröffentlichung im Kreise unserer Freunde mir schon seelisch ein besonderes Anliegen ist. Angesichts der zur Zeit so reichhaltigen „Enthüllungsliteratur“ in Sport, Königshäusern usw. und angesichts der zum Teil unglaublichen Vorgänge im Bildungswesen schwöre ich, dass ich hier „nichts als die reine Wahrheit“ verkünde.*

*In the context of the European co-operation and accompanied of new political ideas within national framework at present a profound change of the German university nature takes place. This has effects on the engineering sciences as well as on the structure of our university.*

### **1 Politische Entwicklung und gegenwärtiger Stand**

Die politische Meinung um die Ausbildung ist seit etwa 6 Jahren durch eine Reihe von Vorurteilen und Kapriolen geprägt, von denen ich hier nur einige Statements ausführen möchte:

- „Die Bundesregierung sah mit Besorgnis einen Rückgang der Attraktivität deutscher Hochschulen für ausländische Studierende im Vergleich zu den Hauptkonkurrenten (USA, Australien, England und Frankreich) (BMBF 1997). Angeblich
  - ist das deutsche Diplom im Ausland nicht bekannt,
  - erlaubt das Fehlen einer konsekutivstruktur es ausländischen Studienbewerbern nicht, nach ihrem ersten Abschluss im Ausland einen zweiten Abschnitt (nicht Promotion sondern Diplom) in Deutschland zu machen.“
- „Die relativ lange Studiendauer von 6,7 Jahren (Durchschnittswert nach BMFT, 1997) schreckt

auch Deutsche vor dem Studieren ebenso ab wie die verkrusteten Lehrstrukturen und das Fehlen eines echten Wettbewerbs mit innovativen Angeboten. Das System verhindert die Mobilität der Studierenden.“

- „Die Rahmenprüfungsordnungen sind als Instrument der Qualitätssicherung an Hochschulen ungeeignet und stellen ebenfalls wie die Kapazitätsverordnung und die Curricularwerte überkommene staatliche Regelungen dar, die den Entwicklungsprozess der Hochschulen behindern.“

Man kann über diese Statements nachdenken und die Gründe hierfür suchen. Sicherlich ist die „demokratisch geprägte Verstaatlichung“ als Folge der 68er und die daraus abzuleitenden nahezu unbeweglichen Gremienstrukturen ein wichtiger Grund für diese Entwicklung – schließlich konnten sich Dank dieser Strukturen auch die Wissenschaftsministerien entsprechend aufblähen. Warum aber Deutschland von seinem einphasigen Studiengang des Diploms (mit dem wir in der Vergangenheit unseren weltweiten wissenschaftlichen Ruhm begründet haben und den es in den meisten europäischen Ländern in ähnlicher Weise gibt) abweichen soll zugunsten eines historisch nur in England (und seinen ehemaligen Kolonien wie z.B. USA, Australien, Kanada, Indien ...) vorhandenen Systems, kann durchaus kritisch diskutiert werden. Auch der Wettbewerb um die Studenten hat – im Gegensatz zu Deutschland – in anderen Ländern durchaus eine Grund: Es ist der Wettbewerb um Studiengebühren, der in ausländischen Hochschulen zum Teil nichts mit Qualitätssicherung zu tun hat.

Wir sind uns auch darüber einig, dass Überlegungen zur Studienreform insbesondere in den Ingenieurwissenschaften hier in Deutschland begleitet werden von dem besonderen Verhältnis der Hochschultypen: Die Fachhochschulen drängen mit allen Mitteln in die Gleichberechtigung zu den Universitäten und erzielen damit auch zunehmend Erfolge. Ob das „(FH)“ bei der Titelvergabe einfach weggelassen wird, ob sie sich „University of Applied

Sciences“ nennen, ob sie mit ausländischen Universitäten fragwürdige Franchise-Kooperationen eingehen oder ob sie hohe Ministerialbeamte zu Honorarprofessoren machen, sie nerven einfach und ergreifen auch die Anlässe zur Überlegung neuer Studienstrukturen zur Einbringung ihrer Gleichwertigkeitsbestrebungen.

Bei all dieser Diskutiererei – die im Übrigen in der Kulturministerkonferenz seit 1997 in gleicher Weise geführt wurde – dürfen wir aber eine durchschlagende Tatsache nicht vergessen: Nach der Sorbonne-Erklärung 1998 unterzeichneten 29 europäische Länder (mittlerweile sogar 32) 1999 in Bologna eine Erklärung zur Harmonisierung der Hochschulausbildung in Europa, die auf eine Stärkung der Wettbewerbsfähigkeit und Attraktivität europäischer Hochschulen mit Ziel 2010 ausgerichtet ist. Die darin festgelegten Grundlagen

- System leichtverständlicher und vergleichbarer Abschlüsse
- Unterteilung in
  - Zyklus bis zum ersten berufsqualifizierenden Abschluss mit der Abschlussbezeichnung *Bachelor* (undergraduate)
  - Zyklus nach dem ersten Abschluss bis zum zweiten berufsqualifizierenden Abschluss mit der Abschlussbezeichnung *Master* (graduate)
  - (Die Einordnung des Promotionsstudiums (postgraduate) wurde zwar erwähnt aber eigentlich hiervon nicht berührt.)

sind eine politische Entscheidung, an der auch in den zur Zeit besonders in den Fakultätentagen laufenden endlosen Grundsatzdiskussionen nicht mehr zu rütteln ist.

Gleichzeitig bzw. seit 1998 lief in Deutschland ein Prozess der „Entstaatlichisierung“ ab, d.h. die politisch gewollte Abgabe der Ausbildungsverantwortung von staatlicher Seite über die Rahmenprüfungsordnung an die Hochschulen selbst, die sich nun einer neuen Art der Qualitätssicherung zu unterwerfen haben, nämlich der Akkreditierung durch privatwirtschaftliche Agenturen. Da in Deutschland die Bildung Ländersache ist, musste eine bundesweite Regelung über die Kultusministerkonferenz herbeigeführt werden, die in einem Beschluss vom 5.3.1999 folgendes festlegte (stichwortartig und unvollständig):

- Abkehr von der institutionellen Differenzierung nach dem Hochschultyp (Universität versus Fachhochschule) zugunsten einer Differenzierung nach Studiengangsprofilen
  - stärker anwendungsorientiert
  - stärker forschungs- (oder theorie-)orientiert.

Der Unterschied der Hochschultypen wurde mit dem politischen Schlagwort „gleichwertig aber nicht gleichartig“ hinweggewischt.

- Abschlüsse und Abschlussbezeichnungen des zweiphasigen Studiengangs (Bachelor und Master wegen der Harmonisierung in Europa) müssen
  - der materiell-inhaltlichen Ausrichtung Rechnung tragen und
  - wegen der Transparenz und Übersichtlichkeit eine möglichst geringe Anzahl von Namen aufweisen.

Mittlerweile gibt es hier die Entscheidung der KMK, nur noch (egal, von welcher Hochschule man kommt) folgende Gradbezeichnungen zuzulassen:

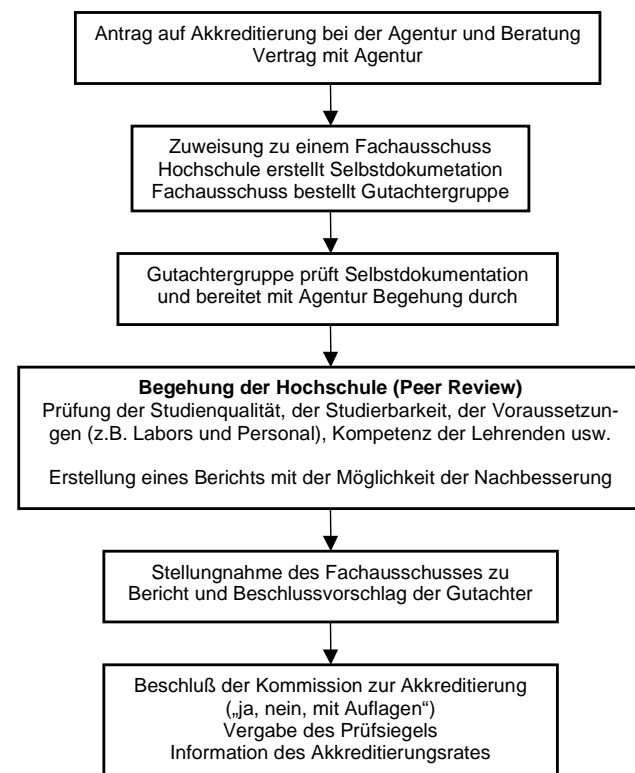
- Bachelor/Master of Arts
- Bachelor/Master of Science
- Bachelor/Master of Engineering
- Bachelor/Master of Law
- Bachelor/Master of Economy
- Bachelor/Master of Business Administration
- Die Zulassung von Studiengängen ist an eine erfolgreiche Akkreditierung zu knüpfen, die von den Hochschulen beantragt und von einer akkreditierten Akkreditierungsagentur durchgeführt wird. Der Staat prüft nur noch, ob er einen solchen Studiengang bezahlen kann.

## 2 Akkreditierungsverfahren und Überwachung

Der Gedanke einer Akkreditierung geht von der an sich richtigen Einstellung aus, dass der Staat nicht gleichzeitig finanzieller Träger der Hochschulen und gleichzeitig ihr fachlicher Evaluator sein kann. Dies ist sicher auch konform mit den z.B. im neuen Niedersächsischen Hochschulgesetz festgelegten Grundsätzen der Autonomie von Hochschulen, die sich mit Hilfe von Hochschulräten, Stiftungseigenschaften, Zielvereinbarungen und neuen Leitungsstrukturen ihr Schicksal bis hin zum Bankrott selbst gestalten können – von den von unserem Wissenschaftsminister angestrebten

Finanzierungsmodellen über Studiengebühren mal ganz abgesehen.

Das Akkreditierungsverfahren stellt die Erfüllung von Mindeststandards für einen Studiengang fest. Damit beginnen eigentlich schon die Zweifel an der Wirksamkeit. Worin unterscheidet sich denn eine gute Universität von einer schlechten Fachhochschule (oder eine schlechte Universität von einer guten Fachhochschule – jajajajajaja!). Wenn die Latte auf diese Weise so nahe am Boden liegt, kann doch jeder drüberspringen. Hinzu kommt die



**Bild 1:** Verfahrensablauf bei der Akkreditierung

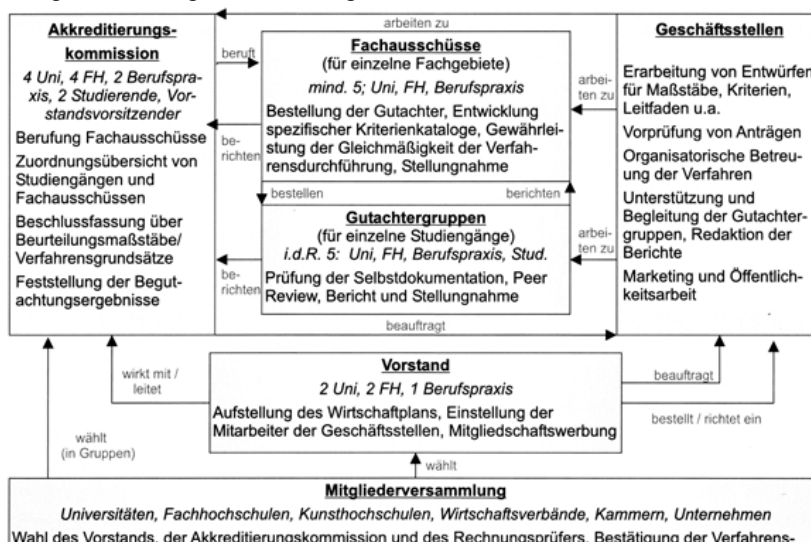
Erfahrung aus den bisherigen Akkreditierungsverfahren, dass eigentlich noch keinem Studiengang bisher die Akkreditierung verweigert wurde und höchstens retardierende Momente mit eventuellen Auflagen erzeugt wurden. Es gibt allerdings Bestrebungen, eine zweite, etwas

höher aufgehängte „Latte“ einzuführen, an deren Überwindung sich dann nur wenige Hochschulen wagen - mit dem Ziel, eine fachliche Elite zu bilden. Aber das dauert sicherlich noch!

Das nächste Problem sind die auf der Basis wirtschaftlich selbständiger Unternehmen basierenden Akkreditierungsagenturen und ihr Arbeitsauftrag. Es gibt dabei regionale wie die ZEVA (Zentrale Evaluationsagentur) in Niedersachsen oder fachlich ausgerichtete wie die ASII (Akkreditierungsagentur für Studiengänge der Ingenieurwissenschaften und der Informatik), insgesamt zur Zeit 6 Stück. Bei einer Gesamtzahl von ca. 10.000 Studiengängen in Deutschland, die alle auf eine Akkreditierung und den Übergang in ein B/M-Studium warten, ist das eine schier nicht bewältigbare Aufgabe (bisher nehmen nur 1,1% der Studierenden an den neuen Studiengängen teil), vor allem wenn man das komplizierte Verfahren der Akkreditierung, wie es in **Bild 1** dargestellt ist, qualifiziert durchführen will. Übrigens – nach den üblichen Verfahren der Qualitätssicherung gilt die Akkreditierung nur über eine gewisse Zeit – nach fünf Jahren muss reakkreditiert werden. **Bild 2** zeigt die komplexe Struktur einer Akkreditierungsagentur und die Entscheidungsverläufe - ich bezweifle danach auch, dass man in Deutschland die Fachausschüsse, Kommissionsmitglieder und Gutachtergruppen (Peers) zu diesen nervtötenden Evaluierungsprozeduren zusammenbekommt (wäre vielleicht was für geschasste Industrielle oder emeritierte Professoren?). Und wenn man bedenkt, dass ein Verfahren etwa 15.000 € kostet, dann kann man sich die Menge des Geldes ausrechnen, die von den Hochschulen aus ihrem Etat allein für die Akkreditierung ihrer Studiengänge aufgebracht werden muss. An eine Erhöhung des Hochschuletats seitens der Ministerien wegen Akkreditierung glaube ich nicht.

Wer überwacht nun die Qualität der Agenturen, bei denen natürlich die Gefahr besteht, dass die beiden Argumente „Umsatzsteigerung“ und „Qualität der Akkreditierung“ nicht immer konform gehen. Sicher wird es da Unterschiede geben – die gibt es schon heute -, so dass man sich bei der Qualität einer Hochschule auch nach der Qualität der Agentur fragt, die sie akkreditiert...

Aber da haben wir grundsätzlich den **Akkreditierungsrat**, eine bereits 1998



**Bild 2:** Struktur einer

probeweise eingeführte und jetzt dauerhaft bestätigte Institution von ehrenamtlich tätigen Persönlichkeiten aus Hochschulen (5 einschl. Vorsitzenden), Politik (2), Wirtschaft (2), Gewerkschaft (2) und Studierenden (2).

Der Akkreditierungsrat, der nunmehr der Kultusministerkonferenz direkt berichtet (früher der Hochschulrektorenkonferenz) hat die Aufgabe, die Anforderungen an die Akkreditierung von Studiengängen und die Anforderungen an die Akkreditierung von Akkreditierungsagenturen bundesweit festzulegen und zu überwachen (bis 2002 hat er auch selbst Studiengänge akkreditiert – sozusagen als Testfeld). Für beides sind Grundsätze und Verfahrensregeln in einem 2000 erschienen Referenzrahmen erstellt worden, alle Agenturen müssen die festgelegten Bedingungen zur Genehmigung als Agentur erfüllen und ihre eigenen Vorgehensweisen nach dem Referenzrahmen richten. Es gibt Jahresberichte, Abstimmungen untereinander (z.B. Meldungen über durchgefallene Akkreditierungsversuche) und die exemplarische Begleitung von Akkreditierungsverfahren durch Mitglieder des Akkreditierungsrates. Der Akkreditierungsrat hat aber schon heute auch die Aufgabe, die aufkeimenden Probleme bei dem „Konkurrenzgebaren“ der Agenturen zu lösen, Streit zu schlichten, Beschwerden nachzugehen usw. Grundsätzlich klappt das aber an sich ganz gut, es ist nur für die „Ehrenamtlichen“ ein äußerst mühsames Geschäft und stellt hohe Anforderungen an Sorgfalt und Abwägung einschließlich der Verfassung von Evaluationsberichten – also so ziemlich genau das, von dem ein Ingenieur in seiner Freizeit träumt.

Aber es knirscht auch schon im Gebäck der Akkreditierung. Den Hochschulen ist das Verfahren natürlich zu langwierig und zu teuer. Schon werden Gedanken laut, dass die Akkreditierungsbürokratie die Genehmigungsbürokratie ablöst, schon gibt es Definitionen zu einem „virus accreditis“ oder die ersten Erscheinung einer „accreditation fatigue“ – was uns permanent über die Wirksamkeit und die möglichen Verbesserungen nachdenken lässt. Wir betrachten uns dabei als lernendes System.

### 3 Bachelor und Master

Viel interessanter als das Procedere der Anerkennung ist aber die grundsätzliche

Hinwendung zu einem neuen, von der Struktur unserer bisherigen Studiengänge völlig unterschiedlichen System, mit dem sich manche meiner Kollegen nicht befassen, weil sie glauben, dass man es vermeiden kann. Oh Ihr Ahnungslosen!!!

Natürlich hat der zweiphasige Studiengang Vorteile

- für die Industrie, die auf diese Weise jüngere (und damit billigere) Absolventen erhält ohne auf die älteren und besser ausgebildeten Master (=Diplomingenieur) zu verzichten,
- für die Studierenden selbst, die auch nach kürzerer Studienzeit ins Berufsleben gehen können und den zur Zeit herrschenden langen „Ausbildungsschlauch“ in zwei Etappen mit Zwischenentscheidung machen können,
- für die Politiker, die sich die Reform, die Internationalisierung und die größere Mobilität der Studierenden an die Fahne heften möchten und fest darauf vertrauen, dass damit die Studienzeiten sinken (auch hier gibt's offenbar Ahnungslose),
- und nicht zuletzt die Fachhochschulen, die das Vehikel wieder mal zur Pflege ihres Gleichstellungskomplexes nutzen.

Eine etwas qualifiziertere Darstellung über die

| Faktor  | FH            | Uni           | TU            |
|---|---------------|---------------|---------------|
| Verbesserte nationale Wettbewerbsfähigkeit                                      | 3,0<br>(0,80) | 2,7<br>(1,00) | 2,5<br>(1,02) |
| Verbesserte internationale Wettbewerbsfähigkeit                                 | 3,2<br>(0,88) | 3,2<br>(0,91) | 3,4<br>(0,63) |
| Förderung internationaler Studierendenmobilität                                 | 3,3<br>(0,87) | 3,2<br>(0,88) | 3,7<br>(0,46) |
| Reduktion der Abbrecherzahlen   | 2,0<br>(1,01) | 2,8<br>(1,04) | 2,3<br>(0,80) |
| Attraktion zusätzlicher Studierender  | 2,9<br>(0,76) | 3,2<br>(0,94) | 2,8<br>(1,26) |
| Attraktion speziell ausländischer Studierender                                  | 3,0<br>(1,02) | 3,1<br>(0,82) | 3,9<br>(0,35) |
| Nachfrageorientierte Diversifizierung und Flexibilisierung des Studienangebotes | 2,9<br>(0,90) | 3,2<br>(0,90) | 3,1<br>(0,83) |
| Verkürzung der Studienzeiten  | 1,9<br>(0,85) | 2,6<br>(1,12) | 2,4<br>(0,63) |
| Chance zur Erneuerung der Studieninhalte und -methoden                          | 2,9<br>(0,91) | 3,2<br>(0,91) | 3,1<br>(1,03) |
| Verstärkte Praxisorientierung   | 2,0<br>(0,84) | 2,4<br>(0,79) | 1,8<br>(0,80) |
| Verstärkte Forschungsorientierung   | 2,5<br>(0,96) | 2,0<br>(0,83) | 1,7<br>(0,73) |
| Stärkung der Interdisziplinarität   | 2,7<br>(1,03) | 2,9<br>(0,85) | 2,7<br>(0,98) |
| Mittelfristig Einnahmen aus Studiengebühren                                     | 2,0<br>(1,02) | 1,5<br>(0,81) | 1,4<br>(0,76) |

Anmerkung: Der Mittelwert (die erste Zahl) weist auf die Bedeutung jedes Faktors hin (höhere Werte bedeuten größere Bedeutung), und die Standardabweichung (in Klammern) bezeichnet den Grad der Einigkeit unter den Teilnehmern (hohe Werte bezeichnen große Uneinigkeit). Nicht alle Teilnehmer haben sämtliche Fragen beantwortet, deshalb schwankt die Zahl der Antworten je Faktor.<sup>1</sup> Quelle: CHEPS/CHE Umfragedaten.

**Tabelle 1:** Mit der Einführung von B/M-Studiengängen verbundene Hoffnung der Hochschulen /1/

Erwartungen der Hochschulen an die neuen Studiengänge gibt **Tabelle 1** nach einer Befragung in 2002. Aber es gibt auch Kritik und Ressentiments. Wenn man mal von den an ihren bisherigen Strukturen klebenden reaktionären Hochschullehrerkollegen absieht, die die Abkehr von der „traditionsreichen und weltweit anerkannten“ deutschen Ausbildung bejammern und selbst bei formaler Anerkennung den bisherigen Wein nur in neue Schläuche abfüllen wollen, so herrscht eine verständliche Unsicherheit vor Inangriffnahme eines so einschneidenden Schrittes:

- Die Einführung des B/M-Systems bedeutet den Tod des Diplomstudienganges. Eine Parallelfahrt gibt es schon aus Kapazitätsgründen nicht oder nur für eine Übergangszeit. In der Tat haben sich die meisten Universitäten zu einer Einführung bei begrenzter Beibehaltung der alten Studiengänge entschlossen – dies lässt sich meines Erachtens nicht durchhalten!
- Noch hat die Industrie nicht zu erkennen gegeben, dass sie auch tatsächlich Bachelor einstellt. Die ersten Bachelor (oder die aus anderen Ländern) haben bisher keine Berufschancen, daher muss die zweite Etappe des Master auf jeden Fall als konsekutiver Studiengang offenstehen.
- Kann die Profilbildung (anwendungs- oder forschungsorientiert) überhaupt qualifiziert durchgeführt werden oder fallen wir durch die unterschiedlichen Interessen der Hochschulen und Hochschultypen in ein Chaos?
- Man befürchtet, dass die neue Struktur zur Aufgabe des Prinzips der Humboldt'schen akademischen Freiheit des Studierenden an den Universitäten zwingt und damit die Universitäten „verschulen“. Dies bedeutet auch die Aufgabe eines großen Vorteils deutscher Absolventen: Die Selbständigkeit und die Fähigkeit zur Selbstorganisation.
- In einigen Fachgebieten wird befürchtet, dass der Zwang zur Berufsfähigkeit schon nach drei Jahren den didaktischen Aufbau des Studiums unvorteilhaft verändert und vereinheitlicht.
- Aus den Erfahrungen mit internationalen Austauschprogrammen weiss man, dass die neuen Strukturen überhaupt nicht mobilitätsfördernd sind – zumindestens so, wie sie in anderen Ländern gehandhabt werden.

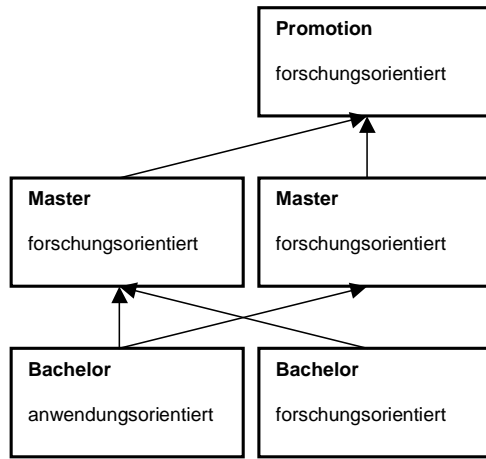
Können wir aus den Erfahrungen in anderen Ländern lernen? In einer europäischen Konferenz in Amsterdam im September kam heraus, dass jedes Land seine eigenes Süsschen mit unterschiedlichen Zutaten kocht. Die nordischen Länder haben meistens konsekutive Studiengänge, die nicht von einer Generalagentur überwacht werden. In Großbritannien herrscht das totale Chaos schon aus der geschichtlichen Entwicklung, jede Hochschule kann ihre Titel ohne Akkreditierung und Inspektionen vergeben, Wales, England, Irland und Schottland haben unterschiedliche Systeme und verständigen sich nur über einen „code of practice“ und „frameworks of qualification“ – wir können froh sein, dass wir geschichtlich nicht so belastet sind und uns neue Gedanken machen dürfen! Am ähnlichsten in der Ideenfindung sind uns noch die Holländer, während z.B. die Flamen eigene Wege gehen und bei den Österreichern nur die (eine oder zwei) Fachhochschulen über B/M-Studiengänge nachdenken. Auch in der Profilbildung gibt es unterschiedliche Wege: Von „professional“ versus „academic“ über „research orientated“ versus „non research orientated“ bis zur Nichtanerkennung der Fachhochschulen und eigene Abschlüsse gibt es eigentlich alles – auch da können wir nicht lernen.

Der Akkreditierungsrat arbeitet deshalb an der Erstellung von Referenzrahmen in zwei Feldern:

- Deskriptoren für die *Profilierung eines Studienganges* (gilt für Bachelor und Master) als Hilfe für die Agenturen.
- Deskriptoren für die *Anforderungen an Studierende* zur Erlangung des Abschlusses Bachelor oder Master (unabhängig vom Profil)

Über allem steht das politisch gewollte Prinzip der Durchlässigkeit, wie es in **Bild 3** dargestellt ist, insbesondere soll der Zugang zur Promotion unabhängig vom Profil bei allen Abschlüssen (z.T. auch aus dem Bachelor heraus) möglich sein.





*Zugangsvoraussetzungen je nach Hochschultyp unterschiedlich*

**Bild 3:** Durchlässigkeit der Profiltypen

Genau so wichtig ist aber der Einschnitt zwischen Bachelor- und Masterstudiengängen. Ausgehend von der Vorstellung, dass künftig 70% der Bachelorabsolventen die Hochschule in Richtung Industrie verlassen und nur 30% einen Master anstreben, sind die Zulassungsbedingungen für den Masterstudiengang so scharf zu formulieren, dass nicht einfaches Verweilen an einer Hochschule automatisch zur Erlangung des nächsten Grades führt!

Genau diese beiden Definitionen werde künftig die Chance darstellen, die (meist) forschungsorientierten Universitäten von den (meist) lehrorientierten Fachhochschulen zu unterscheiden. Dies ist aber eine Entscheidung nach aktueller Qualität, nicht nach Institution, und diese Qualität muss bei der Akkreditierung nachgewiesen werden! Bezüglich der Profilbildung fallen mir folgende Stichworte zu nachprüfbaren Deskriptoren ein:

**Forschungsorientierte Studiengänge** beruhen auf dem Prinzip der Einheit von Lehre und Forschung. Das Profil und seine Deskriptoren haben sich pragmatisch nach den Bedürfnissen der späteren Abnehmer (z.B. Industrie, Forschungszentren) zu richten und nicht nach vorwiegend akademischen Überlegungen zu Inhalt und Bedeutung von „Anwendung“ oder „Forschung“. Dies stellt Anforderung und liefert Akkreditierungskriterien:

- Die Lehrenden müssen nachweislich forschen
- Die personelle und sachliche Ausstattung für eigenständige Forschung, an denen Studierende partizipieren können, muss über die Einrichtungen für die Lehre hinaus vorhanden sein.

- Die Lehrinhalte sollten über die Fachkompetenz hinaus besonders Methoden- und Systemkompetenz vermitteln, die zu eigenverantwortlicher Forschungstätigkeit auch der Studierenden anregt.

**Anwendungsorientierte Studiengänge** sollen das Fach- und Methodenwissen für die Lösung berufsspezifischer Frage- und Problemstellungen vermitteln. Dies stellt Anforderungen und liefert Akkreditierungskriterien:

- Die Lehrenden müssen über wirtschaftliche, industrielle oder andere Berufserfahrungen verfügen.
- Die Ausstattungen müssen mindestens die Anforderungen an die Lehre abdecken
- Die Lehrinhalte müssen neben einer wissenschaftlich orientierten Grundlagenausbildung die Anwendung des Wissens für berufsspezifische Fragestellungen beinhalten. Fallstudien erhöhen die Fähigkeit zur exemplarischen Problemlösung.

Die Deskriptoren für die Anforderungen bei Studienabschluss sind durch den Akkreditierungsrat bereits beschrieben. Eine differenzierte Ausgestaltung wäre wünschenswert, da die zur Zeit gängigen Formulierungen sehr viel Interpretationsspielraum beinhalten. Für die Ausgestaltung des Promotionsstudienganges sind entsprechende Deskriptoren unerlässlich und anhängig.

#### 4 Schlussbemerkung

In Beantwortung der eingangs gestellten Frage möchte ich die Schlussfolgerung ziehen, dass die unter sehr seltsamen politischen Argumenten (Spinnerei kann ich bejahen) begonnenen Änderungsbemühungen vor allem infolge des Bologna-Prozesses zur Zeit eine Realisierung erfahren, die unsrem Bildungssystem gut tun wird. Beide „Begleiterscheinungen“, nämlich die europäische Harmonisierung und die gewonnene Autonomie der Hochschulen geben einen Handlungsspielraum, von dem wir vor einigen Jahren noch geträumt haben. Für den Ausweg aus der Bildungskrise kann ich nicht garantieren – die Möglichkeit besteht und sollte angesichts der mühsamen Diskussionen nicht auf den biologischen Abbau der Widerstände warten.

#### Literatur:

- /1/ Studie zur Einführung von Bachelor- und Masterprogrammen an deutschen Hochschulen. DAAD 2002.



- /2/ Tauch, C. und Rauhvargers, A.: Survey on Master Degrees and Joint Degrees in Europe. European University Association. European Commission . Sept. 2002
- /3/ Proceedings: Joint Quality Initiative. Workshop Sept. 20, 2002. Hilton Hotel Schiphol Amsterdam. Einzusehen über [www.jointquality.org](http://www.jointquality.org)
- /4/ Towards Shared Descriptors for Bachelors and Masters. A report from Joint Quality Initiative informal group. 2002
- /5/ Künftige Entwicklung der länder- und hochschulübergreifenden Qualitätssicherung in Deutschland. Beschluss der Kultusministerkonferenz vom 1.3.2002
- /6/ Fortschreibung der Strukturvorgaben für die Einführung von Bachelor-/Bakkalaureus- und Master-/Magisterstudiengängen. Beschluss der Kultusministerkonferenz vom 5.3.1999
- /7/ Akkreditierungsrat: Referenzrahmen für Bachelor-/Bakkalaureus und Master-/Magister-Studiengänge. Juli 2001

# *Transportable Maschine zur Anfasung von Rohren zur Schweißnaht Vorbereitung*

**Söver, A.**

*Transportable Maschinen zur Anfasung von Rohren und zur Vorbereitung bei der Anbringung von Schweißnähten werden besonders in der Öl und Gas Industrie aber auch in anderen Industriezweigen benutzt, die Rohre einsetzen. Diese Firmen benutzen unterschiedliche Arten von Rohren die geschweißt werden oder zusammengebaut werden müssen. Diese Firmen arbeiten normalerweise weit weg von den Industrie gebieten. Unter diesen Bedingungen besteht oft nicht die Möglichkeit diese Rohre in einer Fabrik zu bearbeiten zu lassen. Um zu garantieren dass die Rohre richtig geschweißt werden, müssen sie zuerst einen mechanischen vorbereitenden Prozeß durchlaufen. Die Rohrvorbereitung kann am gleichen Platz durchgeführt werden, wo sie später auch geschweißt werden.*

*The „Portable Pipe Beveling Machine“ is used particularly in the oil, gas and other industries which make use of pipes. These companies use different types of pipe, which need to be welded or assembled. These companies usually work far away from industry. Under these conditions they do not have the service to process these pipes in a factory. In order to guarantee that the pipes are properly welded, they must first undergo a mechanical preparatory process. Furthermore, pipe preparation may be undertaken in the same place where they will be welded.*

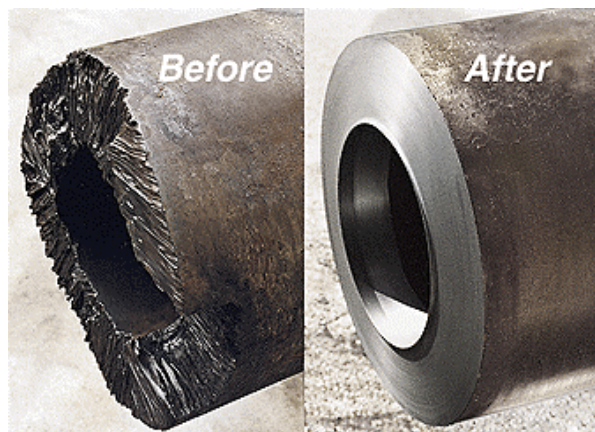
## **1 Einleitung**

Der Name des Projektes war " Transportable Maschine zur Anfasung von Rohren zur Schweißnahtvorbereitung ", mit den folgenden Eigenschaften:

- Arbeitsdurchmesser zwischen 50 mm - 200 mm.
- der minimale Klemmdurchmesser beträgt 50 mm.
- 1.5 PS (1.1 Kilowatt) pneumatische Antriebsmotor

Die Maschine ist so konzipiert, dass sie für alle Tätigkeiten eingesetzt werden kann, um Rohre für das Schweißen vorzubereiten. In **Bild 1** sehen Sie

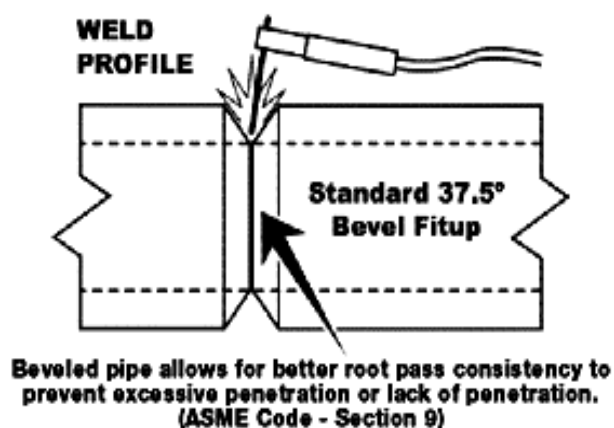
den Unterschied zwischen einem Rohr, bevor und



nachdem es mit dieser Maschine bearbeitet wurde.

**Bild 1:** Bevor und nachdem bearbeiten

Diese Maschine ist sicher genug, um in gefährlichen Umgebungen verwendet zu werden, die offene Flammen verbieten und die Ausrüstung kann für den Fernbetrieb konfiguriert werden. Die vorbereitende Bearbeitung für dieses Rohr verbessern die Qualität des Schweißens, **Bild 2**.



**Bild 2:** Verbesserung der Qualität des Schweißens

Einige typische Schweißverbindungsprofile, die mit dieser portablen Maschinen verwirklicht werden können, sind in **Bild 3** dargestellt.

## 5 - Spannvorrichtung für Werkzeuge

## 6 - Spannvorrichtung für das Rohr.

## 7 –Zuführvorrichtung

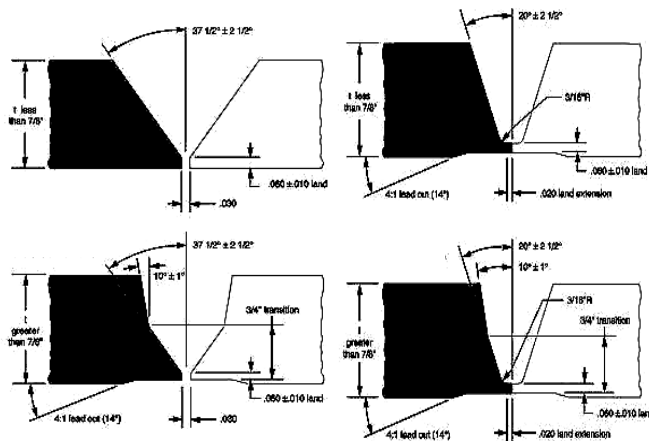


Bild 3: Typisches Schweißverbindungsprofil

## 2. Antreiben der Maschine (Bild 5)

Die meisten Maschinen benutzen einen pneumatischen Antrieb, da sie so sanfter laufen, und dabei auch noch neben anderervorteile gegenüber haben.

Die Hauptvorteile der pneumatischen Maschine sind :

- Leistungsgewicht - normalerweise sind sie 10 mal leichter als elektrische Maschinen bei gleiche Leistung

- sehr sicher, Überlastmoment bringen

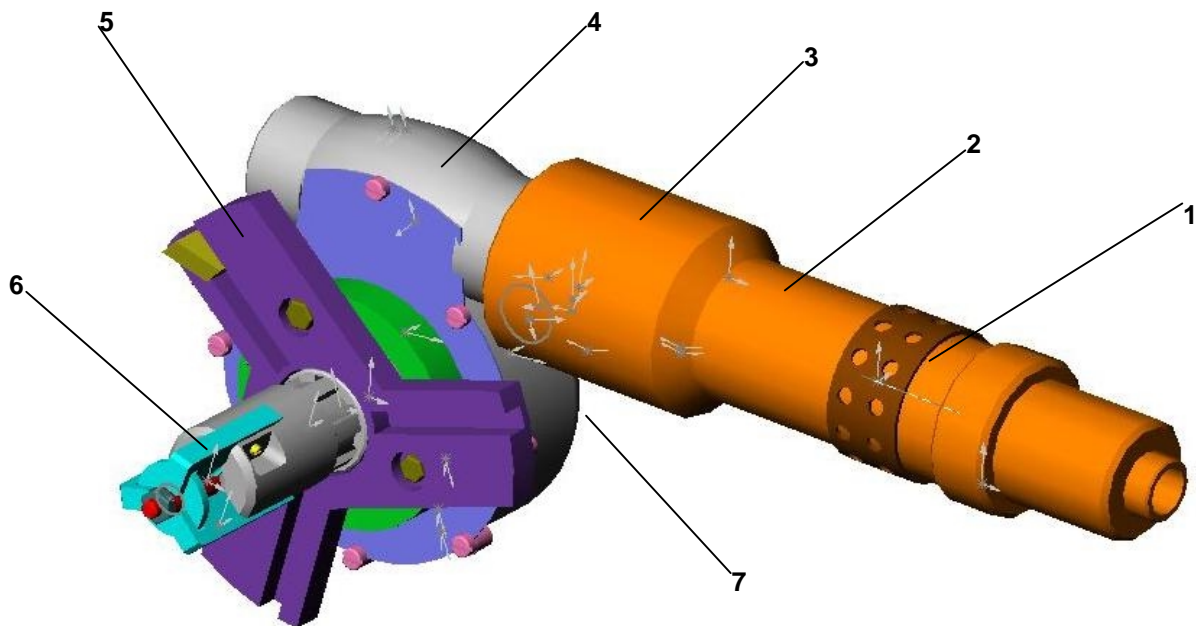


Bild 4: Die Maschine zur Anfasung von Rohren zur Schweißnaht Vorbereitung

Die Maschine in **Bild 4** hat folgenden Bestandteile :

1- Antriebsmotor.

Der Drehung Bewegung wird durch folgende Untersetzung realisiert:

2 – Planetengetriebe I

3 – Planetengetriebe II

4 – Schneckengetriebe

Vorrichtung zur Einspannung:

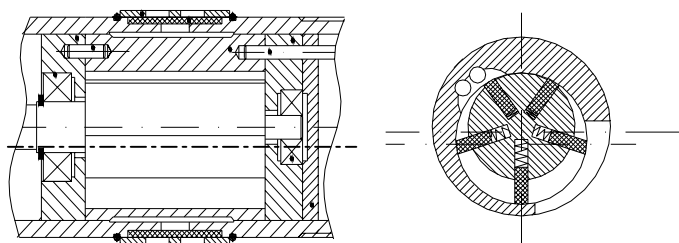
keine zusätzliche Gefahr mit sich

- einfache Wartung
- flexibles Regelung möglich
- umweltfreundlich
- bequeme Luftzufuhr

Der gezeigte pneumatische Antriebsmotor hat die folgenden Eigenschaften:

- 1.5 PS ( 1.1 Kilowatt ) für Zufuhrdruck 6 bar ( 0.6 MPa )

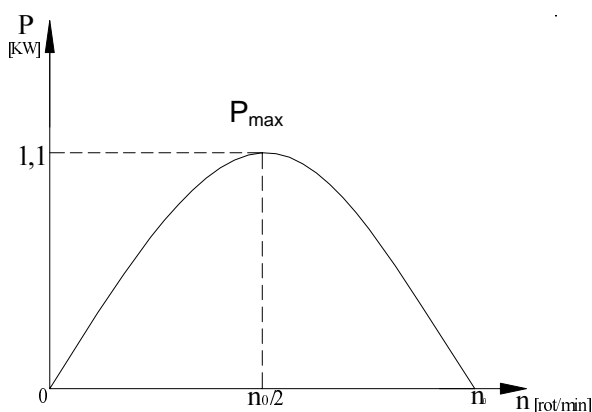
- kein Reversierbetrieb ( Verdrängemaschine )
- 5 Schaufelblatte
- $8.000 \text{ min}^{-1}$ , Höchstdrehzahl
- Nenn- Druckbereich 5 - bar 6 ( 0.5 - 0.6 Mpa )



**Bild 5:** Der pneumatische Antriebsmotor

Die Haupteigenschaften eine pneumatischen Antriebsmotors sind:

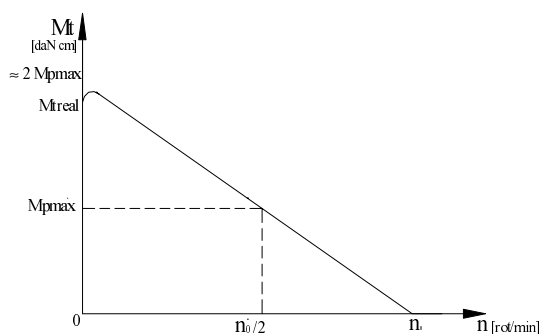
Die Leistungs-Drehzahl Kurve sieht man in **Bild 6**.



**Bild 6:** Die Energie Kurve

Die maximale Leistung eines pneumatischen Antriebsmotors wird bei " $n/2$ " erreicht, also bei der Hälfte der Drehzahl. Um die maximale Energie zu haben, muss der Motor nah an dieser Position arbeiten.

Die Drehmomenten wird in **Abbildung 7** dargestellt.



### **Bild 7:** Drehmomentkennlinie

Die Drehkraftkurve ist für eine pneumatische Maschine eine Gerade.

Um eine gute Arbeitsweise für die pneumatische Maschine zu erzielen werden, die Schnittparameter unter Zuhilfenahme verschiedene Untersetzungsgetriebe auf die Motorkennlinie abgestimmt.

Normalerweise ist die Geschwindigkeit für die Anfassungsmaschinen (mit Arbeitsdurchmesser zwischen 50 mm - 200 mm) ca. 20 - 80 Umdrehung / Minute.

Um diese Geschwindigkeit zu erhalten benutzen wir 3 Untersetzungsstufen:

- zwei Planetengetriebe
- ein Schneckengetriebe

Wir wählen das Planetengetriebe wegen seiner kleinen Größe, was für handgeführte Maschinen besonders wichtig ist.

### **3. Berechnung für die Spanabhebende Bearbeitung**

Diese Berechnung wird für die maximale Belastung der Maschine benötigt, wenn die Maschine ein Rohr mit einem Durchmesser von 200 mm bearbeitet.

#### **3.1. Berechnung der maximalen Belastung für die pneumatische Maschine**

$$M_{p\max} = 95.500 \cdot \frac{P_{\max}}{\frac{n_0}{2}}$$

$P_{\max}$  – die maximale Belastung für pneumatische Maschinen.

$$P_{\max} = 0,736 \cdot 1,5 \approx 1,1 \text{ [KW]}$$

$$n_0 = 8.000 \text{ min}^{-1}$$

$$M_{p\max} = 26,262 \text{ [daN·cm]}$$

#### **3.2. Berechnung der Kraft und des Momentes**

Die Gesamtschnittkraft ist:

$$F_t = \sqrt{F_z^2 + F_y^2 + F_x^2} \approx 1,1 \cdot F_z \text{ [daN]}$$

Die Hauptschnittkraft :

$$F_z = C_4 \cdot t^{x_1} \cdot s^{y_1} \cdot HB^{n_1} \text{ [daN]}$$

Vorschub pro Umdrehung:

$$s = 0,16 \text{ mm/U}$$

Spandicke :

$$t = 4 \text{ mm}$$

Der Vorschub, die Spandicke wurden für die Bearbeitung Schnellarbeitsstahl.

$C_4$  - Koeffizient für das Material und das Werkzeugmaterial.

$x_1, y_1$  - Tiefe und Spandickeexponenten.

- Material C 85

- Werkzeugstahl ' HSS '

$$x_1 = 1; y_1 = 0,75;$$

HB- Brinellhärte des Rohr material

$$HB = 220 \text{ daN/mm}^2$$

$n_1$  - Exponent zur Berücksichtigung der Materialhärte

$$n_1 = 0,75$$

$$F_z = 3,57 \cdot 41 \cdot 0,160,75 \cdot 2200,75$$

$$F_z = 206,364 \text{ [daN]}$$

$$F_T = 1,1 \cdot F_z \text{ [daN]}$$

$$F_T = 1,1 \cdot 206,364$$

$$F_T = 227,673 \text{ [daN]}$$

### 3.3. Berechnung des Drehmomentes

$$M_{Tnot} = F_T \cdot r$$

$r$  - Rohrradius

Alle Berechnungen sind für die maximalen Abmessungen erfolgt, die mit dieser Maschine bearbeitet werden können.

Außendurchmesser 200 Millimeter.

$$M_{Tnot} = 227 \cdot 100$$

$$M_{Tnot} = 2.270 \text{ [daN} \cdot \text{cm]}$$

Das notwendige Moment der pneumatische Maschine. [N<sub>m</sub>]

$$M_m = \frac{M_{Tneces}}{i_T \cdot \eta_T} \text{ [daN} \cdot \text{cm]}$$

$$i_T = i_{PG1} \cdot i_{PG2} \cdot i_{SG};$$

$i_{PG1}$  – erstes Übersetzungs- Verhältnis des Planetengetriebes

$i_{PG2}$  - zweites Übersetzungs- Verhältnis des Planetengetriebes

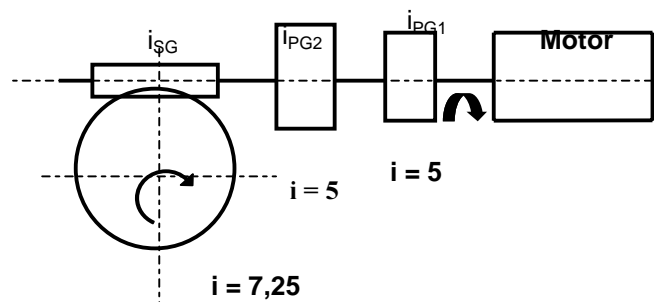
$i_{SG}$  – Übersetzungs-Verhältnis des Schnecken-Getriebes

$\eta_T$  – gesamt Wirkungsgrad die Übersetzung,

$$i_{PG1} = 5; i_{PG2} = 5; i_{SG} = 7,25$$

$$i_T = 5 \cdot 5 \cdot 7,25$$

$$i_T = 181,25$$



**Bild 8:** Mechanische Ersatzbild

$$\eta_T = \eta_{PG1} \cdot \eta_{PG2} \cdot \eta_{SG}$$

$\eta_{PG1}$  – Wirkungsgrad für das erste Planetengetriebe

$\eta_{PG2}$  - Wirkungsgrad für das zweite Planetengetriebe

$\eta_{SG}$  – Wirkungsgrad des Schneckengetriebes.

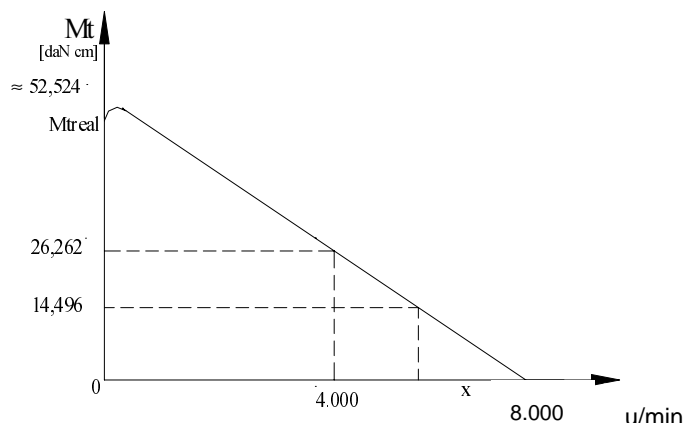
$$\eta_{PG1} = 0,98; \eta_{PG2} = 0,98; \eta_{SG} = 0,9$$

$$\eta_T = 0,98 \cdot 0,98 \cdot 0,9$$

$$\eta_T = 0,864$$

$$M_m = \frac{2270}{181,25 \cdot 0,864}$$

$$M_m = 14,495 \text{ [daN} \cdot \text{cm]}$$



**Bild 9:** Drehmomentkennlinie

Anhand von **Bild 9**, wird die optimale Motordrehzahl errechnet.

$$\frac{x}{8000} = \frac{M_{not}}{2 \cdot M_{p \max}} \Rightarrow$$

$$P_{motor} = 1,5 \text{ CP}; 1\text{CP} = 0,736 \text{ KW}$$

$$P_{motor} = 0,736 \cdot 1,5 \approx 1,1 \text{ KW}$$

Wir errechnen „ $M_{pma}$ “ für „ $n_0/2$ “, den Punkt in dem die pneumatische Maschine ihr maximale Leistung entfaltet.

$$M_{p \max 1} = 95500 \cdot \frac{P}{\frac{n_0}{2}} [\text{daN} \cdot \text{cm}]$$

$$M_{p \max 1} = 95500 \cdot \frac{1,1}{4000}$$

$$M_{p \max 1} = 26,262 [\text{daN} \cdot \text{cm}]$$

Das maximale Moment der pneumatischen Maschine liegt bei der Drehzahl.

$$M_{p \max} = 2 \cdot M_{p \max 1}$$

$$\frac{x}{8000} = \frac{M_{x \text{ neces}}}{2 \cdot M_{p \max 1}} \Rightarrow$$

$$x = \frac{8000 \cdot M_{x \text{ neces}}}{2 \cdot M_{p \max 1}} \Rightarrow$$

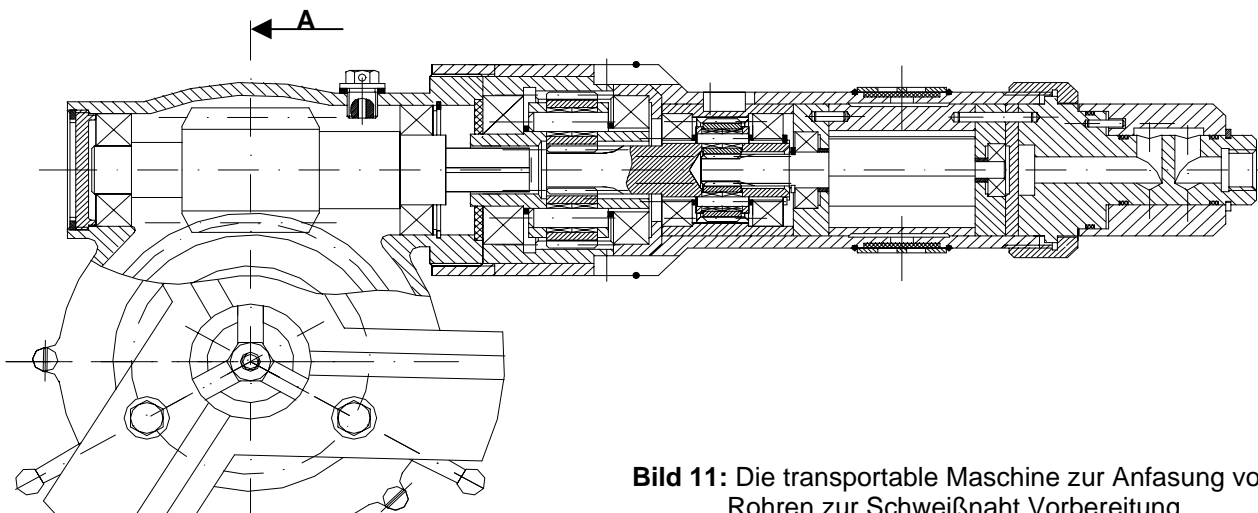
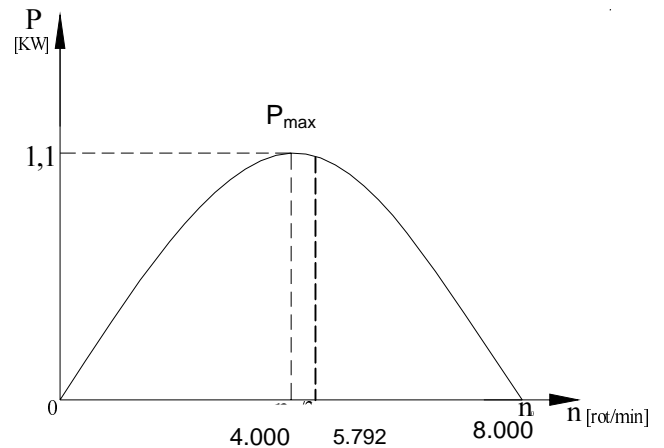
$$x = \frac{8000 \cdot 14,495}{2 \cdot 26,262}$$

$$x = 2208$$

Die optimale Drehzahl ist dann:

$$8000 - x = n_{r1}$$

$$n_{r1} = 5792 \text{ min}^{-1}$$

**Bild 10:** Das Leistungsdiagramm mit optimale

drehzahl

Folglich ist die reale Geschwindigkeit:

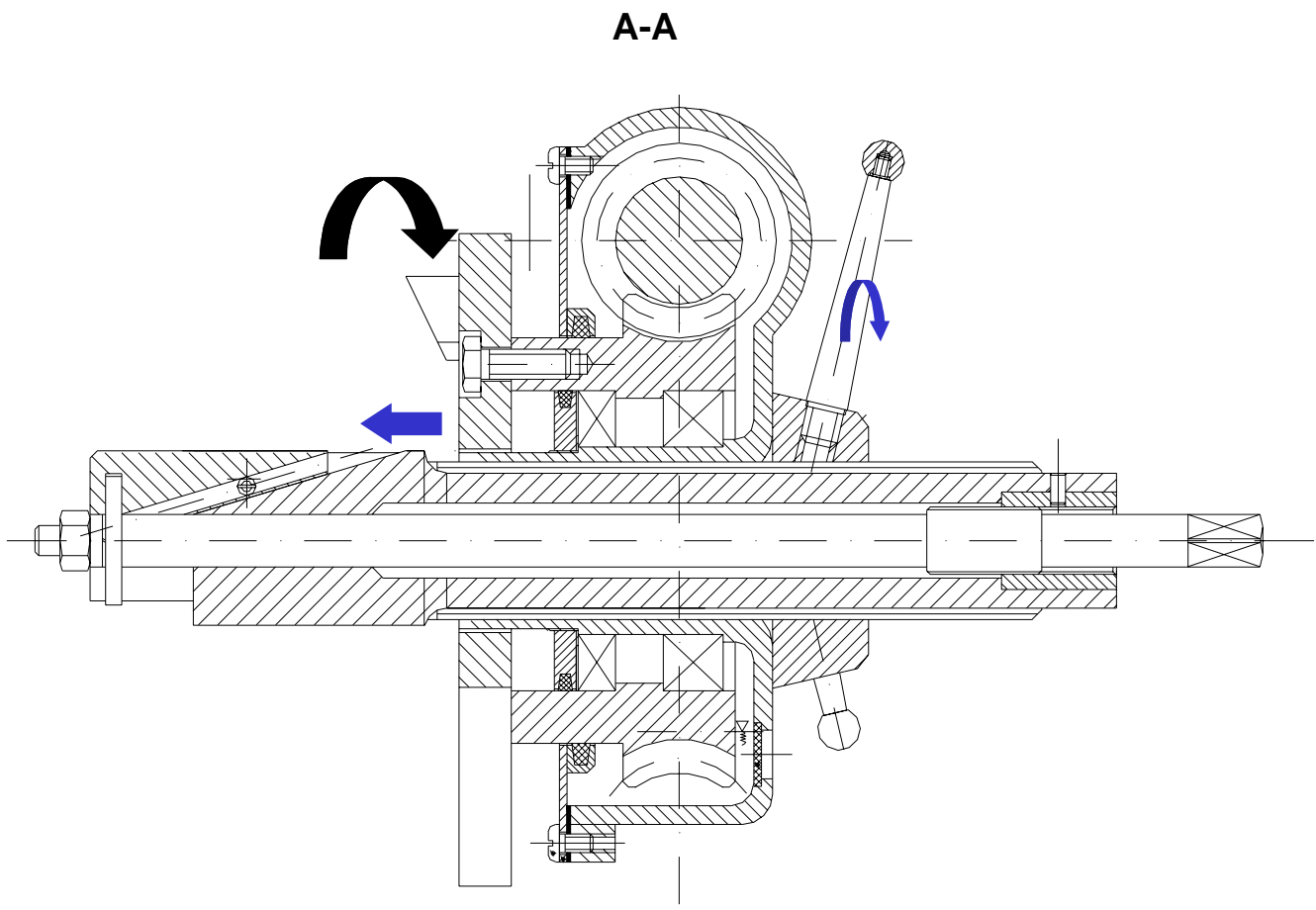
$$n_{maschine} = \frac{n_{r1}}{i_T} \text{ min}^{-1}$$

$$n_{maschine} = \frac{5792}{181,25}$$

$$n_{maschine} \approx 35 \text{ min}^{-1}$$

Die Schnittgeschwindigkeit ist 35 Umdrehungen, auch so wie in Fachliteratur empfohlen wird.

**Bild 11:** Die transportable Maschine zur Anfasung von Rohren zur Schweißnaht Vorbereitung



**Bild 12:** Die Kinematik der Maschine

In Bild 11 und 12 ist die konzipierte Maschine und ihre Kinematik zu erkennen.

Durch die Einspannvorrichtung wird das Rohr fixiert. Die Maschine fährt durch Keile geführt über eine Welle bis zur Rohrkante. Danach wird die Maschine über einen Gewindeflansch in Richtung Rohrkante bewegt.

- /4/ Crudu, I., s.a., Atlas Reductoare cu roti dintate, Edidura Didactica si Pedagogica Bucuresti 1981
- /5/ Handra-Luca, V., Stoica, I.A. Introducere in Teoria Mecanismelor, vol. I-II, Editura Dacia, Cluj – Napoca 1982
- /6/ Draghici, I, s.a., Organe de Masini. Probleme, Editura Didactica si Pedagogica, Bucuresti 1981

#### 4 Literatur

- /1/ Dubbel- Taschenbuch für den Maschinenbau. 14. Auflage Springer Verlag 1981
- /2/ Decker, Maschinenelemente, Function, Gestaltung, und berechnung. 15. Auflage Hanser
- /3/ Antal, Albert, Tataru, O., Elemente privind Proiectarea Angrenajelor. Editura ICPIAF 1998

# Einflüsse der geometrischen Gestaltung von Zahnwellen-Verbindungen mit Evolventen-Zahnprofil auf deren Beanspruchungsverhalten

Qingsong H.; Schäfer G.

*Zahnwellen-Verbindungen mit Evolventen-Zahnprofil besitzen Spannungskonzentrationen im Zahnfuß im Kontaktbereich und Verzahnungsauslauf. Die Geometrie der Welle und der Nabe, sowie die Belastungsarten beeinflussen die Spannungskonzentration in der Verbindung. Die Bestimmung zugehöriger Formzahlen kann durch analytische und numerische Rechnungen (FEM) erfolgen. Am Institute für Maschinenwesen werden seit langen Jahren umfangreiche Untersuchungen über Zahnwellen-Verbindungen durchgeführt.*

*Involute spline has a stress concentration in the tooth feet, and this concentration of stress would be defined as Formzahl. The geometry of the shaft and the hub, the loadings etc. have important effects on stress concentration of the connections. The calculation of Formzahl could be carried out through theoretical or computer-aided calculations. In the last years a lot of research work about involute splines have been done at the Institute für Maschinenwesen.*

## 1 Einleitung

Zahnwellen-Verbindungen gehören zu den grundlegenden Verbindungselementen des Maschinenbaus wegen ihrer hohen Drehmoment-Übertragungsfähigkeit und axialen Verschiebbarkeit. Die Schäden an diesen Verbindungen lassen sich grob in zwei Gruppen einteilen: Bruchschäden und Schäden durch Flankenverschleiß. Ursache für den Bruch ist häufig die Kerbwirkung im Zahnfuß und die verbundene Spannungskonzentration. Die Kerbwirkung ist eine der wichtigsten Einflussgrößen auf die Schwingfestigkeit der Zahnwellen-Verbindungen.

Die kerbbedingte Spannungskonzentration wird mit Hilfe der Formzahl definiert. Dazu wird die höchste, in der FE-Rechnung oder durch theoretische Rechnungen ermittelte Kerbspannung zur analytisch berechneten Spannung im ungestörten Querschnitt ins Verhältnis gesetzt /2/:

$$\alpha_K = \frac{\text{maximale Kerbspannung}}{\text{Nennspannung}} \quad (1.1)$$

Diese Methodik wurde für die Welle und Nabe nach DIN 5480 mit geometrischen Variationen unter verschiedenen Belastungsarten durchgeführt:

- **Wellenparameter:** Zähnezahl (Bezugsdurchmesser der Wellen sind gleich); Radius R des Zahnauslaufs (**Bild 2.2**); Verhältnis Verzahnungslänge der Welle zur Verzahnungslänge der Nabe; Verschleißzustand der Flanken
- **Nabe:** Breite der Nabe; Nabe mit oder ohne Flansch

Die Untersuchungen zum Einfluß der Geometrie bei Zahnwellen-Verbindungen unter reiner Torsion werden durch FE-Sektormodelle von Welle und Nabe mit Flankenkontaktelementen durchgeführt. Die Einspannebene ist im ungestörten Bereich der Welle vor der Verzahnung.

Für alle FE-Modelle der Verbindungen nach DIN 5480 45x2x21 hat die Nabe einen Außendurchmesser  $d_{e2}=90\text{mm}$  und eine Verbindungsbreite  $b = 25\text{mm}$ .

## 2 Formzahl der Welle bei reinem Drehmoment

Das Beanspruchungsverhalten im Zahnfuß einer mit Drehmoment belasteten Zahnwellen-Verbindung wird durch verschiedene geometrische Faktoren beeinflusst. Reines Drehmoment  $T=1500\text{ Nm}$  wird am äusseren Rand der Nabe beim Verbindungsende eingeleitet.

Der Nenndurchmesser der Zahnwelle wird berechnet nach /3/

$$d_h = d + 0,15 \cdot \left( \frac{d}{D} \right) \cdot (D - d) \quad (2.1)$$

Für Zahnwelle DIN 5480-W 45x2x21,

$$d_h = 40,4 + 0,15 \cdot \left( \frac{40,4}{44,6} \right) \cdot (44,6 - 40,4) = 41,5\text{mm}$$

Nennspannung

$$\sigma_{\text{Nenn}} = \frac{T}{W_{T\text{Nenn}}} \quad (2.2)$$

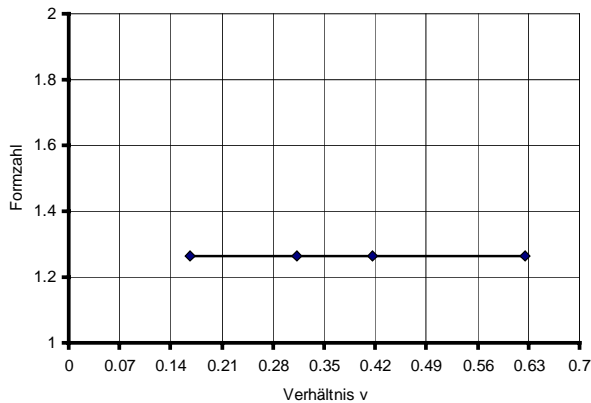
Für Zahnwelle DIN 5480-W 45x2x21 unter Drehmoment  $T=1500\text{ Nm}$ ,



$$\sigma_{Nenn} = \frac{1500000 Nmm}{3,142 \times 41,5^3} = 213,7 Nmm^{-2}.$$

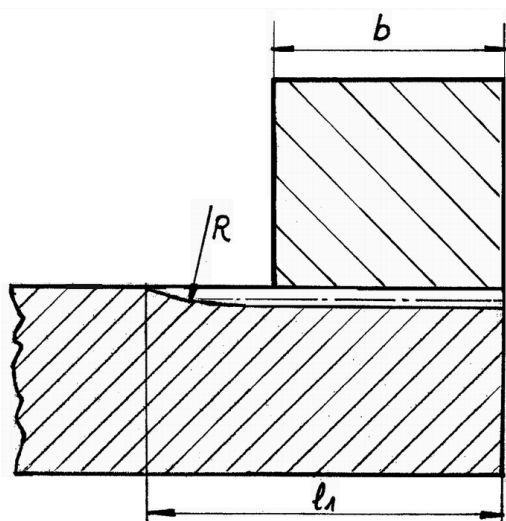
32

Die FE-Berechnungen wurden für geometrische Variationen bezüglich der Längenverhältnisse der Wellen- und Nabenverzahnungen durchgeführt. Sie zeigen, dass das Verhältnis der Verzahnungslänge der Nabe  $b$  (Kontakbreite) zur Verzahnungslänge der Welle  $l_1$   $v = b/l_1$  fast keinen Einfluss auf die Formzahl hat. **Bild 2.1** zeigt die Formzahl der Welle in Abhängigkeit der Längenverhältnisse  $v$ .



**Bild 2.1:** Formzahl der Welle in Abhängigkeit vom Verhältnis Verzahnungslänge der Nabe zu Verzahnungslänge der Welle

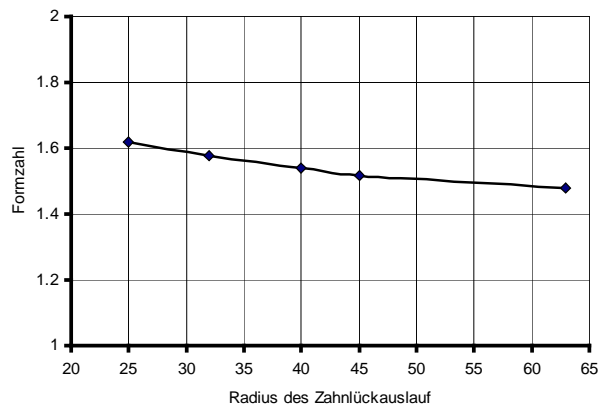
Die folgenden Berechnungen zeigen den Einfluss des Zahnlückenauslaufs auf den Spannungsverlauf im Zahnfuß. Beim Wälzfräsen wird ein Radius  $25 < R < 40$  in der Praxis gefertigt, **Bild 2.2**. Eine feste Normvorgabe für die Fertigung des Zahnlückenauslaufs existiert nicht. Die Zahnwellen-Verbindungen mit sonst gleichen Randbedingung haben verschiedene Formzahlen wegen der verschiedenen Radien des Zahnlückenauslaufs, **Bild 2.3**.



**Bild 2.2:** Geometrie des Zahnlückenauslaufs, bei der Fertigung der Zahnwelle  $25 < R < 40$

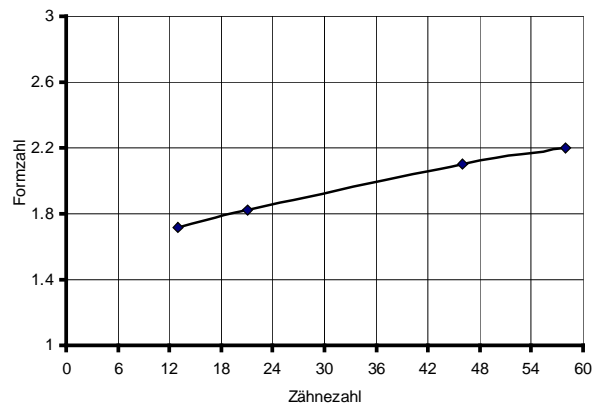
Zahnwellen, die mit größerem Radius am Zahnauslauf gefertigt sind, haben kleinere

Formzahlen, d.h., je größer der Radius des Zahnauslaufs ist, desto kleiner ist die Formzahl der Welle.



**Bild 2.3:** Formzahl der Zahnwelle in Abhängigkeit vom Radius des Zahnauslaufs

Den Einfluss der Zähnezahls ( $z > 6$ ) auf die Formzahl der Zahnwelle zeigt **Bild 2.4** für Zahnwellen nach DIN 5480 mit konstantem Bezugsdurchmesser  $d_B$ .



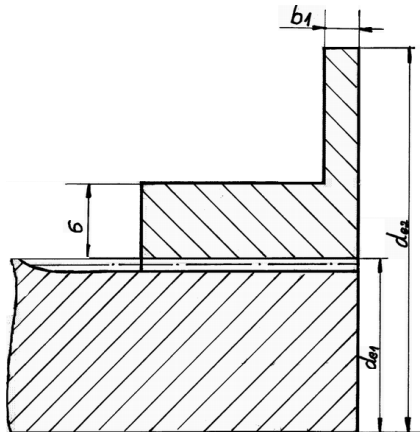
**Bild 2.4:** Formzahl der Zahnwelle bei gleichem Bezugsdurchmesser in Abhängigkeit von der Zähnezahls

Beim Vergleich der Formzahlen in der Wellen können grundsätzliche Unterschiede zwischen kleinen und großen Zähnezahlen festgelegt werden. Mit steigender Zähnezahls nimmt die Formzahl der Welle zu. Die unterschiedliche Ausprägung der Formzahl kann durch die größere Zahnsteifigkeit bei hoher Zähnezahls erklärt werden.

Der Nabenaussendurchmesser, die Einspannung der Nabe, ob die Nabe mit oder ohne Flansch ausgeführt ist u.a. beeinflussen das Spannungsverhalten im Zahnfuß der Welle-Nabe-Verbindungen. Ab einem Verhältnis Nabenaussendurchmesser zu Bezugsdurchmesser  $d_{e2}/d_B > 2$  ist die Steifigkeit nahezu unabhängig von der Nabeneinspannung und dem Nabenaussendurchmesser  $/3/$ .

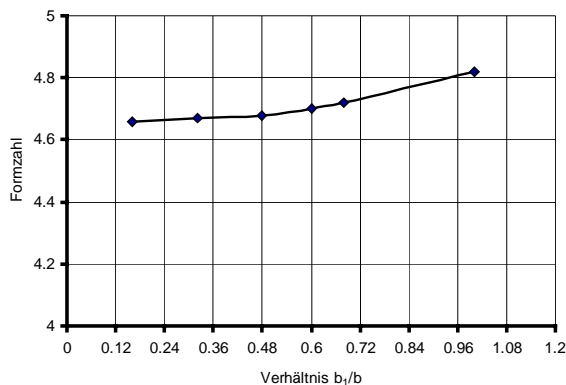
Die Breite der Nabenschultern beeinflusst die Steifigkeit der Nabe, damit auch als Rückwirkung die Formzahl der Welle.

Im nächsten Untersuchungsschritt wird die Nabenaussengeometrie in der Art eines Flansches ausgebildet. Damit ergibt sich eine axial veränderliche Nabensteifigkeit.



**Bild 2.5:** Welle-Nabe-Verbindung, Nabe mit Flansch

Naben mit sehr dünnem Flansch haben eine geringe Steifigkeit, d.h., Welle-Nabe-Verbindungen mit dünnem Flansch erzeugen eine kleinere Spannkonzentration (Formzahl) im Zahnfuß der Welle, **Bild 2.6**.



**Bild 2.6:** Formzahl der Welle in Abhängigkeit von der Flanschbreite

Geometrische Faktoren der Welle-Nabe-Verbindungen haben grundsätzliche Einflüsse auf die Spannungsverteilung im Zahnfuß der Welle. Dies gilt bei allen Belastungsarten, z.B., reines Drehmoment, reines Biegemoment, oder unter der Kombination zwischen Biegemoment, Torsion und Querkraft. Die bisher betrachteten Verbindungen sind nach DIN 5480, ideale verschleißfreie Verbindungen.

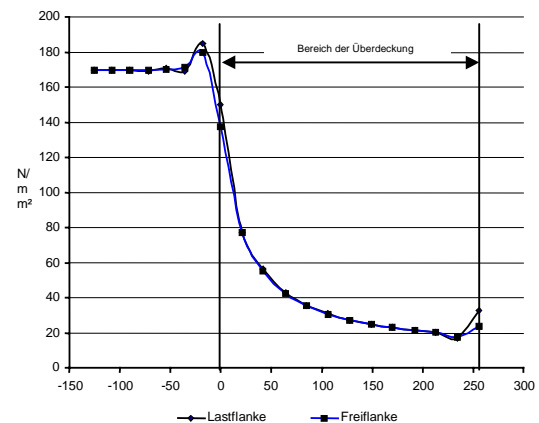
### 3 Verschlossene Zahnwellen-Verbindungen unter reiner Torsion

In der Praxis tritt, abhängig von der Laufzeit, grundsätzlich ein bestimmter Verschleiß auf. Bei extremem Verschleiß wird die Steifigkeit des Zahnes reduziert bei deutlichem Verdrehspiel. Die zweite Versagensursache ist der Dauerbruch im Zahnfuß oder der gesamten Welle.

Der Verschleiß auf den Zahnflanken beeinflusst die Lastverteilung innerhalb der Verbindung und wirkt sich somit auf die lokale Beanspruchungshöhe aus. Letztendlich kann dies zu einer lokalen Verschiebung des Dauerbruchbeginns führen.

Das Beanspruchungsverhalten einer Zahnwellen-Verbindung mit verschlissenen Zähnen kann durch ein volles FE-Volumenmodell simuliert werden. Vergleichend wird auch ein ideales FE-Modell mit gleichen Randbedingungen berechnet und ausgewertet.

**Bild 3.1** zeigt den Spannungsverlauf im Zahnfuß der Zug- und Druckseite der Wellenzähne unter reiner Torsion  $T=100.000 \text{ Nm}$ , DIN 5480x5x34.



**Bild 3.1:** Spannungsverlauf im Zahnfuß der Welle, unverschlissen, reines Drehmoment

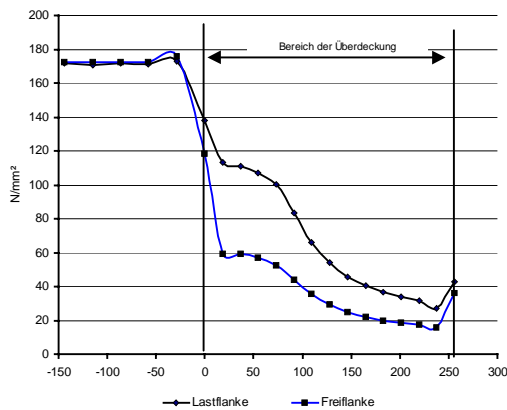
Zahnwellen mit idealem Zahnprofil haben eine Spannungsspitze im ungestörten Bereich. Die Spannungen im Zahnfuß auf der Zug- und Druckseite sind fast gleich groß im gesamten verzahnten Bereich. Unabhängig davon, ob es der mit der Nabe gemeinsame verzahnte Bereich ist oder der davor liegende ungestörte Wellenbereich.

Für das FE-Modell der verschlissenen Verbindung wurde an allen Zähnen der gleiche Verschleiß angenommen. Die Verschleißhöhe über der Axialkoordinate  $z$  wurde an einem realen Bauteil mittels Zahnweitenmessung gemäß **Tabelle 3.1** ermittelt.

|                    |       |       |       |       |       |
|--------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| $z \text{ (mm)}$   | 156   | 176   | 215   | 229   | 385   |
| $s_1 \text{ (mm)}$ | 10,12 | 10,20 | 10,28 | 10,36 | 10,39 |

**Tab.3.1:** Zahndicke in Abhängigkeit von dem Abstand zur Einspannebene

Die Spannungsverteilung der Zug- und Druckseite einer solchen Verbindung ist in **Bild 3.2** gezeigt.



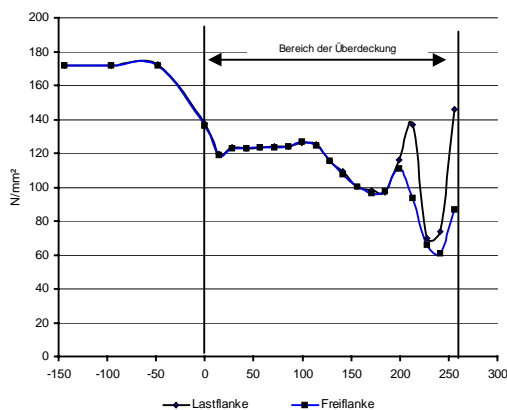
**Bild 3.2:** Spannungsverlauf im Zahnfuß der ganzen Welle, kleinerer Verschleiß

Die maximale Vergleichsspannung im Zahnfuß der verschlissenen Welle ist deutlich kleiner als die von der idealen Welle, der Grund dafür ist der verschleißbedingte Flankenangleich. Im Kontaktbereich ist die Spannung im Zahnfuß der Zugseite größer als die der Druckseite.

Ist der Verschleißbetrag noch größer, **Tabelle 3.2**, dann tritt sogar am lastfreien Verbindungsende ein Spannungspick auf. Die Unterschiede zwischen den Spannungen von Zug- und Druckseite ist sehr klein, **Bild 3.3**.

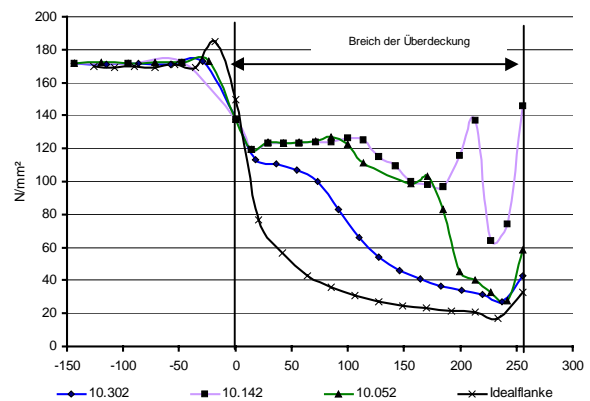
|            |       |       |       |       |       |
|------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| z (mm)     | 156   | 176   | 215   | 229   | 385   |
| $s_1$ (mm) | 10,02 | 10,10 | 10,18 | 10,26 | 10,30 |

**Tab.3.2:** Zahndicke in Abhängigkeit von dem Abstand zur Einspannebene

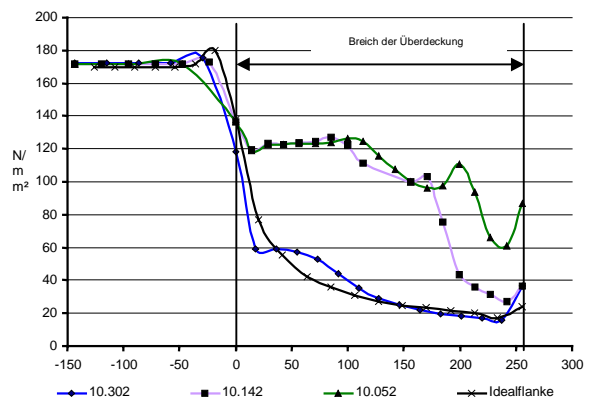


**Bild 3.3** Spannungsverlauf im Zahnfuß der Welle, bei größerem Verschleiß

Die Verschleißhöhe hat Einfluss auf den Spannungsverlauf im Zahnfuß. **Bild 3.4** und **Bild 3.5** zeigen die Spannungsverteilungen der Zug- und Druckseite von verschieden stark verschlissenen Zahnwellen-Verbindungen.



**Bild 3.4:** Spannungsverlauf im Zahnfuß der Zugseite, in Abhängigkeit von der Verschleißhöhe (Zahndicke am Verbindungsanfang)



**Bild 3.5:** Spannungsverlauf im Zahnfuß der Druckseite, in Abhängigkeit von der Verschleißhöhe (Zahndicke am Verbindungsanfang)

#### 4 Zusammenfassung

Der Spannungsverlauf im Zahnfuß einer Zahnwellen-Verbindungen wird durch verschiedene geometrische Faktoren beeinflusst. Für ideale Zahnwellen-Verbindungen unter reinem Drehmoment, durch die Struktur der Nabe, z.B., mit oder ohne Flansch, die Breite des Flansches; der Radius des Zahnlückenauslauf, die Zähnezah, das Verhältnis des Zahnfußrundungsradius zum Modul, die Verbindungslänge, den Nabenaußendurchmesser, u.a., alle diese Parameter haben Einfluss auf den Spannungsverlauf im Zahnfuß der Welle und Nabe. Andere geometrische Einflüsse, z.B., umlaufende Sicherungsringnut, die Lage der Nabe, u.a., haben auch Einfluss auf die Spannungskonzentration. Entsprechende Verschleiß- und allgemein Einflußsimulationen können mit FEM gemacht werden. Die weitere Aufgabe in diesem Gebiet ist, Welle-Nabe-Verbindung unter elastischen und teilplastischen Materialeigenschaften zu berechnen. Ziel ist es die Dauerschwingfestigkeitseigenschaften von Welle-Nabe-Verbindungen durch FEM zu simulieren. Dies

alles muß zur Verifizierung im Vergleich zu den Ergebnisse von Prüfstandsversuchen erfolgen.

### **Literatur**

/1/ Dietz, P.: die Berechnungen von Zahn- und Keilwellen-Verbindungen. Büttelborn, 1978

/2/ Birkholz, H.: Untersuchungen zum Beanspruchungsverhalten spielbehafteter Längsstiftverbindungen. Mitteilung IMW, Clausthal-Zellerfeld, 2001

/3/ Wesolowski, K.: Dreidimensionale Beanspruchungszustände und Festigkeitsnachweise drehmomentbelasteter Zahnwellen-Verbindungen unter elastischer und teilplastischer Verformung. Fortschrittberichte VDI Düsseldorf 1997

# Die Auslegung einer Seiltrommel im teilplastischen Materialbereich

Mupende, I.; Otto, St.

*Für die Dimensionierung von Seiltrommeln werden bis heute oft vereinfachte Berechnungsmethoden verwendet, die das mechanische Gesamtverhalten der Trommel nur unzureichend beschreiben. In jedem Fall aber basieren die mathematischen Ansätze auf den Gesetzen der Elastizitätstheorie – und das obwohl bekannt ist, dass Seiltrommeln während ihres Einsatzes sehr oft plastifizieren. Um den teilplastischen Werkstoffbereich für den Dimensionierungsprozess bewusst auszunutzen, wurden bestehende Berechnungsmodelle im Rahmen der Seiltrommelforschung des Instituts erweitert.*

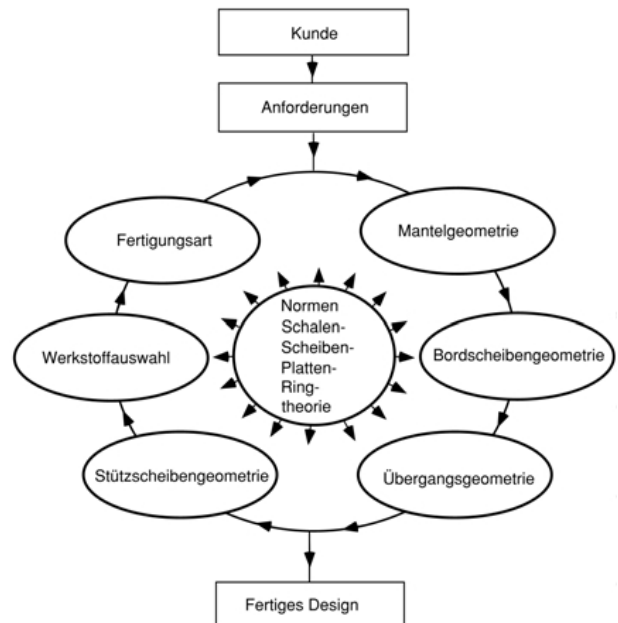
*So far, the dimensioning of hoisting drums is often based on simplified calculation methods that do not describe their mechanical stress- and deformation behaviour comprehensively. These methods take into account only the elastic material law although it is known that hoisting drums often plastify during usage. In order to use the plastic material behaviour for the light-weight-dimensioning, existing calculation methods were further developed within the instituts research work in this field.*

## 1 Einleitung

Die Seiltrommel ist aus Sicht der Kontinuumsmechanik den dünnwandigen Strukturen zuzuordnen, deren mechanisches Verhalten durch die Biegetheorie der Schalen bzw. Kreisringplatten beschrieben wird. Die Belastungen einer Seiltrommel entstehen durch den Seilwickelprozess. Dabei ergeben sich axial auf die Bordscheiben wirkende Streckenlasten und ein über dem Trommelmantel verteilter Druck.

Als Grundlage für die Trommeldimensionierung findet der Konstrukteur in den Normen allerdings nur Informationen über die Zuordnung der Winde zu einer Betriebsart (bzw. einem Lastkollektiv) entsprechend ihrem Einsatzfeld, über die Wahl des Seiles und die damit verbundene Festlegung des Trommelgrunddurchmessers. Ihm steht jedoch keine allgemeingültige Methode – **Bild 1** zeigt den zu durchlaufenden Iterationsprozess – für eine optimale Trommeldimensionierung zur Verfügung. Deshalb wird in der Praxis häufig auf interne Firmenrichtlinien oder vereinfachte

Berechnungsansätze, wie die Ringtheorie, zurückgegriffen. Die so ermittelten Beanspruchungen können bis zu 20% geringer als die tatsächlichen Spannungen sein, was teilweise zu unerwünschten plastischen Verformungen der Trommel oder gar zum Schaden führen kann.



**Bild 1:** Iterativer Auslegungsvorgang einer Seiltrommel /1/

## 2 Beanspruchungsmechanismus und klassische Seiltrommelauslegung

### 2.1 Beanspruchungsmechanismus

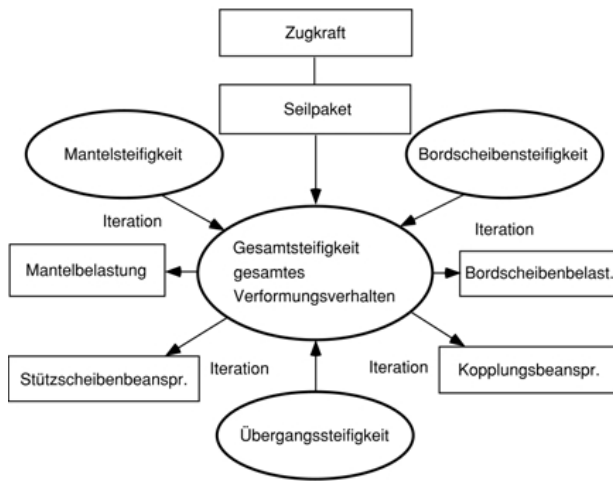
Die Höhe der Trommelbelastungen wird von der Steifigkeit:

- der Trommelstruktur und
- des Seilpaketes

beeinflusst. Dietz /2/, Egawa und Taneda /3/ sowie Henschel /4/ und Neugebauer /5/ geben verschiedene Vorschläge für die Bestimmung dieser Lasten ohne jedoch die Steifigkeitsänderung der Trommel durch Mantel und Bordscheibenverformungen sowie die daraus resultierende Steifigkeitsänderung des Seilpaketes in Radial- und Axialrichtung exakt in Betracht zu ziehen.

Besonders bei mehrlagig bewickelten Seiltrommeln ändert sich die Steifigkeit des Seilpakets infolge der

Bordscheiben- und Mantelverformung. Damit ändert sich auch die Höhe und Verteilung der Belastungen auf diese Komponenten. **Bild 2** verdeutlicht diesen Belastungsmechanismus, welcher direkt mit dem Verformungsverhalten der Trommelstruktur gekoppelt ist.



**Bild 2:** Belastungs- und Beanspruchungsmechanismus einer Seiltrommel /1/

## 2.2 Klassische Seiltrommelauslegung

Die Normen DIN 15020, SEB 666 211, die FEM Sektion 1 und Sektion 9 und ISO 4301 – 4309 enthalten Richtlinien zur Seilauswahl und Trommelauslegung. Danach hat der Konstrukteur folgende Kundenanforderungen, welche gleichzeitig die wesentlichen Gestaltungsparameter der Trommel bilden, abzuklären:

- die Wandstärke des Mantels,
- die Seiltrommellänge,
- die Speicherlänge des Seils respektive die Anzahl der Lagen,
- den Bordscheibendurchmesser und die Bordscheibendicke,
- die Bordscheibengrundgeometrie (gerade, verrippt, schräg),
- den Werkstoff und das Herstellungs- bzw. Fertigungsverfahren (Gießen, Schweißen, Verschrauben)

Diese Designanforderungen werden nicht in einem globalen, iterativ zu durchlaufenden Konzept, wie in **Bild 1** dargestellt, aufeinander abgestimmt, sondern zumeist sequentiell abgearbeitet. Dies hat zur Folge, dass der tatsächliche Beanspruchungszustand nur durch aufwendige

Messungen erfasst werden kann. Für den Betrieb der Trommel besteht außerdem die Gefahr des lokalen Plastifizierens, insbesondere dann, wenn in der Dimensionierung geringe Sicherheitsfaktoren Berücksichtigung finden.

Die Anwendung fließfähiger Werkstoffe bei der Trommelherstellung wirft nun folgende Fragen auf:

- Überschreiten die Belastungen einer Seiltrommel die elastische Grenze?
- Wo sollte in Abhängigkeit der Trommelgeometrie die Grenze der Belastung liegen?
- Was bedeutet dies für den Konstruktionsprozess und welche Kriterien sollte der Konstrukteur für eine teilplastische Auslegung beachten?

## 3 Beanspruchungsverhalten einer Seiltrommel im teilplastischen Materialbereich

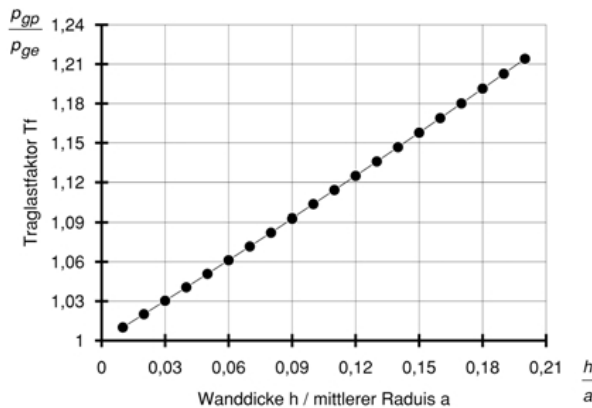
Für die teilplastische Auslegung von Maschinenelementen ist im allgemeinen die Plastizitätstheorie für kleine Verzerrungen anwendbar. Die komplizierte mathematische Beschreibung des Zusammenhangs zwischen Spannung und Dehnung mit Hilfe des Verfestigungsgesetzes führt zu hochgradig nichtlinearen Gleichungssystemen, die lediglich für einfache, symmetrische Geometrien geschlossen lösbar sind. Im Fall des ungelagerten Hohlzylinders bzw. der Schale unter äußerem Druck ist dieser Sachverhalt gegeben, so dass die elastische Grenzlast  $p_{ge}$ , die Grenzlast für Vollplastifizierung  $p_{gp}$ , und der Traglastfaktor  $T_f$ , welcher das Verhältnis beider Grenzlasten beschreibt ( $T_f = p_{gp}/p_{ge}$ ), bestimmt werden können. Der Traglastfaktor gibt somit die Fähigkeit eines Materialquerschnitts an, teilplastisch beansprucht zu werden.

In einer gelagerten Schale (mechanisches Ersatzbild des Mantels), ergibt sich in beliebigen Querschnitten ein Biegemoment  $M_x$ . Infolge dieses Biegemoments sind die Beanspruchungen in einem Punkt der Schale nicht nur vom Radius abhängig, wie es bei der ungelagerten Schale der Fall wäre, sondern auch von der Längskoordinate  $x$ . Die Behandlung des Plastifizierungsproblems mit den Schnittspannungen ( $\sigma_x$ ,  $\sigma_\vartheta$ ,  $\tau_{x\vartheta}$ ) führt deshalb schnell zu nichtlinearen partiellen Differentialgleichungen, welche nur noch numerisch lösbar sind.

Das nachfolgend gezeigte **Bild 3** verdeutlicht den Verlauf des Traglastfaktors in Abhängigkeit des



Verhältnisses von Wanddicke  $h$  zum mittleren Radius  $a$  der Schale. Dabei wurde besonders der Abmessungsbereich üblicher Seiltrommelgeometrien ( $h/a \leq 0,2$ ) näher betrachtet.



**Bild 3:** Traglastfaktor einer ungelagerten Schale mit elastisch – idealplastischem Werkstoffverhalten

Das Diagramm macht deutlich, dass das Ausnutzen der Teilplastifizierung bei ungelagerten Schalen nur in engen Grenzen möglich ist. Für Verhältnisse von  $h/a < 0,1$  (z.B. große Bergbautrommeln) sind bei Annäherung an die elastische Grenzlast praktisch keine Sicherheitsreserven vorhanden. Der Übergang zur Durchplastifizierung und damit das Trommelversagen vollzieht sich somit sehr rasch.

### 3.1 Das Traglastverfahren zur Analyse der Mantelbeanspruchungen im plastischen Materialbereich

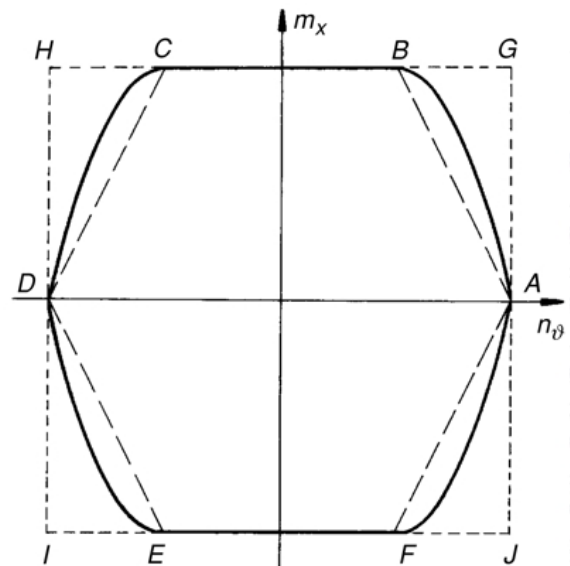
Das Traglastverfahren bietet die Möglichkeit, für eine gelagerte Schale eine geschlossene Lösung des Plastifizierungsproblems anzugeben.

Hiermit können die maximal möglichen Traglasten, d.h. die maximale Normalkraft in Umfangsrichtung ( $N_{\vartheta 0} = \sigma_F \cdot h$ ) bzw. das maximale Biegemoment in Axialrichtung ( $M_{x0} = -0,25 \cdot \sigma_F \cdot h^2$ ) für einen Schalenquerschnitt berechnet werden. ( $h$  ist die Schalenwandstärke und  $\sigma_F$  die Streckgrenze des Werkstoffs).

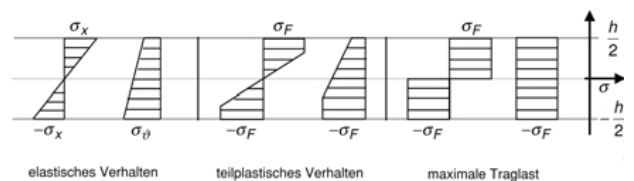
Mit Hilfe dieser Maximalwerte  $N_{\vartheta 0}$  bzw.  $M_{x0}$  können die Schnittgrößen dimensionslos geschrieben werden ( $m_x = M_x / M_{x0}$  und  $n_{\vartheta} = N_{\vartheta} / N_{\vartheta 0}$ ).

In Abhängigkeit der charakteristischen Größen des Mantels (Abklingkonstante  $\chi$ , Länge  $l$ ) und den Randbedingungen beginnt der Plastifizierungsvorgang in der Mitte oder aber an

den Rändern des Mantels und dehnt sich anschließend über die gesamte Länge aus. **Bild 3** ist zu entnehmen, dass der Traglastfaktor für den gesamten Bereich üblicher Schalen klein ist. Dies bedeutet, dass ein Querschnitt bei Überschreitung seiner elastischen Grenzlast schnell durchplastifiziert. Damit ist die Ausdehnung der plastifizierten Zone in erster Näherung nur von der Längskoordinate  $x$  abhängig. Die bekannten Fließbedingungen (von Mises oder Tresca) degenerieren in diesem Fall zu den Interaktionskurven (**Bild 4**), welche die Beziehungen zwischen den Schnittlasten darstellen. **Bild 5** zeigt die Verteilung der dazugehörigen Spannungen in Axial- bzw. Tangentialrichtung ( $\sigma_x$  und  $\sigma_{\vartheta}$ ).



**Bild 5:** Interaktionskurven in den Schnittlastebenen für eine rotationssymmetrische Schale /6/



**Bild 4:** Axial- und Tangentialspannungsverteilung im Mantelschnitt

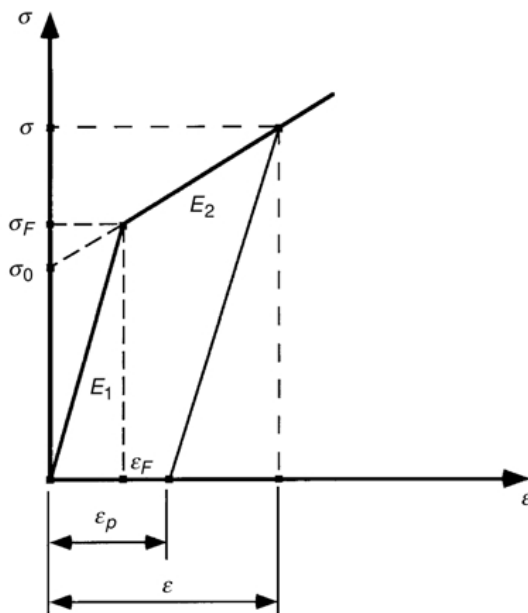
Die Gleichungen für die Interaktionskurven sind:

- Strecke AB:  $m_x + 2n_{\vartheta} = 2$  für  $0,5 \leq n_{\vartheta} \leq 1$  (1)
- Strecke BC:  $m_x = 1$  für  $-0,5 \leq n_{\vartheta} \leq 0,5$  (2)

Für die Analyse des plastischen Verhaltens des Mantels genügt die äußere Kurve „GHJ“ der Interaktionskurven. Damit gelten folgende Interaktionsbedingungen:

- für elastisches Materialverhalten  
 $-1 < n_{\vartheta}$  und  $n_{\vartheta} < -|m_x|$  (3)
- für plastisches Materialverhalten  
 $n_{\vartheta} \leq -1$  (4)

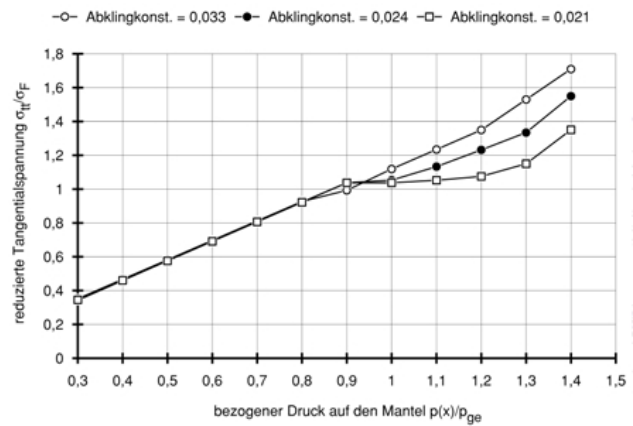
Das Werkstoffverhalten wird als isotrop verfestigend angenommen und durch eine bilineare Approximation (**Bild 6**) vereinfacht wiedergegeben. Mit dieser Annahme wird die Werkstoffverfestigung geringer bewertet, weshalb die Dimensionierung auf der sicheren Seite liegt. Gleichzeitig ermöglicht die lineare Approximation eine analytische Lösung des Systemverhaltens der Seiltrommel mit teilplastischen Materialeigenschaften.



**Bild 6:** Bilineare Approximation des Werkstoffverhaltens

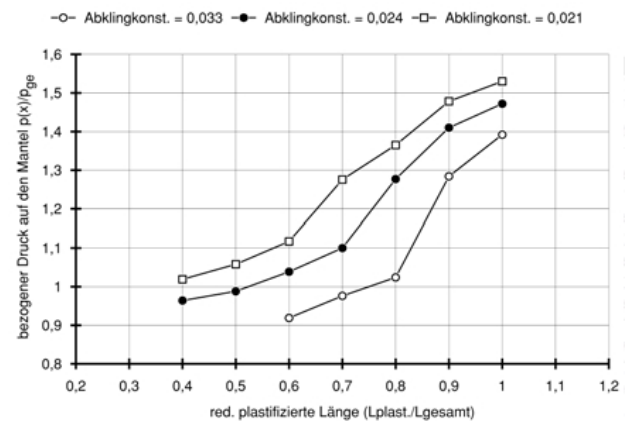
Nach Bearbeitung und Umstellung der Gleichgewichtsbedingungen erhält man den entsprechenden Lösungsansatz für die rotationssymmetrische Schale mit elastischem und plastischem Werkstoffverhalten. Für den elastischen Bereich wird die Radialverformung durch  $w_e(x)$ , für den plastischen Bereich durch  $w_p(x)$  beschrieben [1].

Die Konstanten des Gleichungssystems werden mit Hilfe von 8 Randbedingungen, 4 an den Schalenrändern und 4 an den Übergangsschnitten vom elastischen zum plastischen Bereich, bestimmt.



**Bild 7:** Analytische Berechnung der Mantelbeanspruchung durch äußeren Druck für unterschiedliche Abklingkonstanten

Es ist festzustellen (**Bild 7**), dass die erste Durchplastifizierung des Mantels bei einer Last beginnt, die ca. 90% der elastischen Grenzlaster einer ungelagerten Schale (Ring oder Hohlzylindertheorie)  $p_{ge}$  beträgt. Die anschließende Laststeigerung in Abhängigkeit der plastifizierten Länge ist nicht linear. Bis zur Hälfte der Mantellänge plastifiziert der Mantel langsam – bei geringen Drucksteigerungsraten. Ab einem Verhältnis von  $0,6L_{plast}/L_{gesamt}$  steigt der erforderliche Druck zur weiteren Ausdehnung der plastifizierten Zone in Axialrichtung bis ca.  $1,5 p_{ge}$  stark an (**Bild 8**).



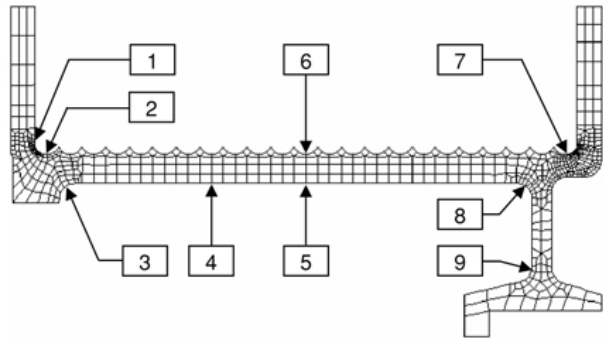
**Bild 8:** Länge der plastifizierten Zone in Abhängigkeit des äußeren Drucks. (durchplastifizierte Länge  $L_{plast}$ , Mantellänge  $L_{gesamt}$ )

### 3.2 Numerische Untersuchung

Die FE-Simulationen wurden mit dem Ziel durchgeführt, die analytischen Berechnungsansätze zur Beschreibung der Mantelbeanspruchungen im plastischen

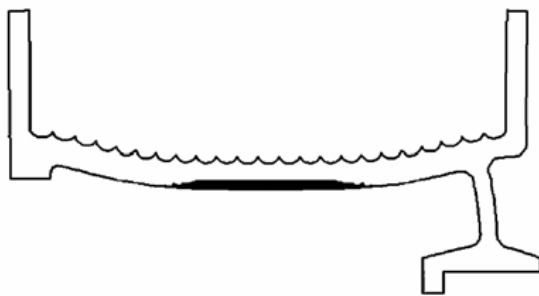


Werkstoffbereich mit dem tatsächlichen Trommelverhalten vergleichen zu können.



**Bild 9:** FE-Modell mit den zur Auswertung verwendeten Punkten

Aufgrund der rotationssymmetrischen Seiltrommelgeometrie und der rotationssymmetrischen Belastungen wurden die Untersuchungen mit einem ebenen, axialsymmetrischen FE-Modell (**Bild 9**) durchgeführt. Die auf die Bordscheiben wirkenden Lasten wurden als Linienkraft abgebildet und der auf den Mantel wirkende gleichmäßig verteilte Druck durch Knotenkräfte angegeben. Für die untersuchte Trommel wurde GGG 40.3 und eine Seilzugkraft von 20 kN angenommen. Die Auswertung erfolgte an den in **Bild 9** gekennzeichneten Punkten.



**Bild 11:** Beginn der Plastifizierung des Mantels bei  $p(x)/p_{ge} = 0,98$



**Bild 12:** Erste Durchplastifizierung des Mantels bei  $p(x)/p_{ge} = 1,05$



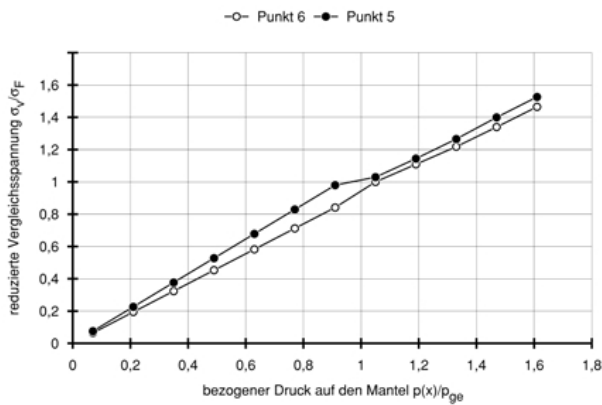
**Bild 13:** Ausdehnung der plastifizierten Zone bei  $p(x)/p_{ge} = 1,12$



**Bild 14:** Ausdehnung der plastifizierten Zone bei  $p(x)/p_{ge} = 1,33$

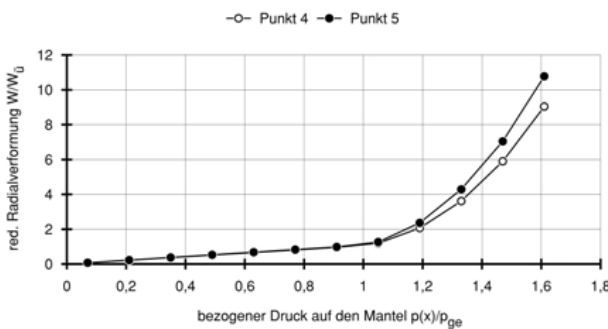
In den vorangegangenen Abbildungen (**Bild 11-14**) ist der Verlauf des Plastifizierungsvorgangs bei steigender Belastung dargestellt. Als Bezugswert wurde die elastische Grenzlast ( $p_{ge} = 32,78 \text{ N/mm}^2$ ) des ungelagerten Mantels gleicher Geometrie angenommen.

Für die Spannungen am inneren Umfang (Punkt 5) bzw. äußeren Umfang (Punkt 6) des Mantels ergeben sich die in **Bild 15** gezeigten Kurvenverläufe. Diese bestätigen die Ergebnisse der analytischen Betrachtungen (**Bild 7**), wonach der Plastifizierungsvorgang in einer gelagerten Schale (Seiltrommelmantel) früher beginnt als im Fall der ungelagerten Schale. Aus **Bild 11** und **Bild 15** bzw. **Bild 18** ergibt sich, dass der elastische Grenzdruck für die Seiltrommel ca. 90% des elastischen Grenzdrucks der ungelagerten Schale  $p_{ge}$  beträgt und die Grenzlast  $p_{gp}$  für eine Durchplastifizierung des Mantels bei ca.  $1,05p_{ge}$  liegt.

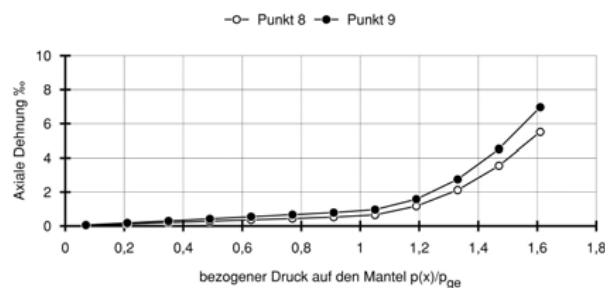


**Bild 15:** Spannungsverlauf an der Innen- und Außenseite des Mantels (Punkt 5 und 6 in Bild 9)

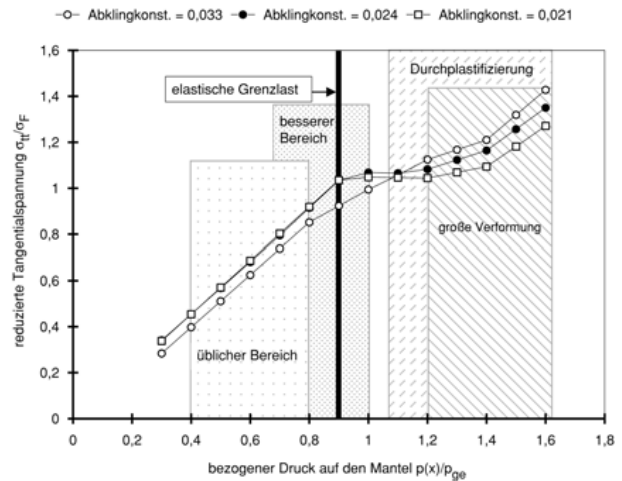
Im Hinblick auf eventuell auftretende unzulässige Verformungen kann konstatiert werden, dass sowohl die Radialverformung als auch die axiale Dehnung des Mantels bis  $1,2p_{ge}$  akzeptable Werte beibehalten.



**Bild 16:** Reduzierte Radialverformung des Mantels in der Trommelmitte



**Bild 17:** Axialdehnung des Mantels in Abhängigkeit des reduzierten Drucks



**Bild 18:** Plastifizierung des Mantels (Trommelmitte) in Abhängigkeit der Abklingkonstante und verschiedener Belastungsbereiche

#### 4 Zusammenfassung

Obwohl Seiltrommeln vielfach aus duktilen Werkstoffen (Sphäroguß und Stahl) hergestellt wurden, basiert die Auslegung ausschließlich auf der Elastizitätstheorie, so dass die Tragfähigkeit des Werkstoffs im plastischen Materialbereich nicht ausgenutzt wird. Ursachen hierfür sind vor allem fehlende Informationen und Berechnungsgrundlagen über das Trommelverhalten bei Teilplastizität. Die Dimensionierung nach der plastischen bzw. der teilplastischen Theorie bietet die Möglichkeit, die Betriebslast zu erhöhen und damit die Leistungsdichte der Seiltrommel zu steigern. Trotz des frühen Beginns der Plastifizierung des Mantels (bei 90% von  $p_{ge}$ ), verbleiben die Beanspruchungen und Verformungen der Trommel bis ca. 120% des elastischen Grenzdrucks in einem kontrollierbaren Bereich. Somit kann der Auslegungsbereich bewusst in Richtung des plastischen Materialverhaltens verschoben werden (Bild 18). Die Abbruchkriterien in der Auslegung bzw. die Versagenskriterien im plastischen Bereich werden durch die Radialverformung (Bild 16) und die axiale Dehnung (Bild 17) vorgegeben. Diese sind während des iterativen Dimensionierungsprozesses zu kontrollieren, um eine Funktionsstörung, wie beispielsweise das Klemmen des Loslagers, zu vermeiden.

#### 5 Literatur

/1/ Mupende, I.: Beanspruchungs- und Verformungsverhalten des Systems

- Trommelmantel – Bordscheiben bei mehrlagig bewickelten Seiltrommeln unter elastischem und teilplastischem Werkstoffverhalten, Dissertation, Curvillier Verlag, Göttingen, 2001
- /2/ Dietz, P.: Ein Verfahren zur Berechnung ein- und mehrlagig bewickelter Seiltrommeln, Dissertation, TH Darmstadt, Darmstadt, 1971
- /3/ Egawa, T. und Taneda, M.: External Pressure produced by Multi-Layers of Rope Wound about a Hoisting Drum; Bulletin of JSME, 1 (1958) 2, 133 – 138
- /4/ Henschel, J.: Dimensionierung von Windentrommeln; Dissertation, Studiengesellschaft Stahlanwendung e. V. und Stiftung Industrieforschung, Düsseldorf, 2000
- /5/ Neugebauer, H.-J.; Berechnungsverfahren für ein- und mehrlagig bewickelte Seiltrommeln; Dissertation, Dresden, 1979
- /6/ Hodge Jr., P. G.: Plastic Analysis of Structures; Mc Graw-Hill Book Company, New York, 1959

## Festigkeitsnachweis für Flanschkupplungen

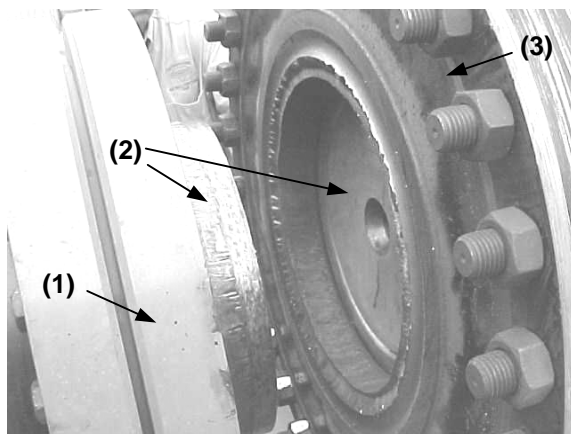
Mupende, I.; Otto, St.

*Bei der Dimensionierung von Flanschkupplungen mittels konventioneller, genormter Berechnungsmethoden werden Zusatzbelastungen im Antriebsstrang, wie Biegemomente und Querkräfte, nur ungenügend berücksichtigt. Gerade aber bei größeren Flanschabmessungen erlangen diese einen maßgebenden Einfluss auf die Bauteilfestigkeit. Es wird ein Konzept vorgestellt, welches die Grundlage neuartiger Berechnungsverfahren bilden kann.*

*The calculation of flange couplings mainly takes into account the torsional loads due to the power transmission. However, additional loads like bending moments and radial loads which are mostly neglected reach an important influence on flange strength especially on those of bigger dimensions. The paper presents a concept idea for a more detailed strength analysis.*

### 1 Überblick zur Thematik

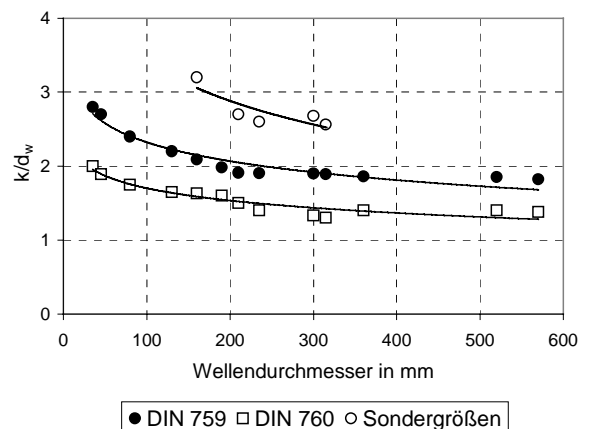
Flanschkupplungen gehören zur Gruppe der nichtschaltbaren starren Kupplungen, mit denen auf konstruktiv sehr einfache und kostengünstige Weise hohe Leistungen im Antriebsstrang übertragen werden können. Im Zuge der heute für den Konstrukteur ständig präsenten und konträren Restriktionen hinsichtlich der Steigerung der Übertragungsleistung bei gleichzeitiger Reduzierung des erforderlichen Bauraums und des Bauteilgewichts erhöhen sich auch die Anforderungen an entsprechend „ausgefeilte“ Berechnungsmethoden für dieses Maschinenelement.



**Bild 1:** Schadensfall an einer Flanschkupplung mit  $d_w = 300$  mm; Schrupfverband (1), Wellenenden (2), Flansch (3)

Neben der Leistungsübertragung zählt das Ausgleichen eines Radial-, Axial- oder/und Winkelversatzes der zu verbindenden Wellenenden ebenfalls zu den Hauptfunktionen einer Kupplung. Sonderbauformen von Flanschkupplungen, wie die drehstarrten Membrankupplungen TWINTORS der Firma BHS, ermöglichen beispielsweise das Ausgleichen eines Winkelversatzes bis zu 0,5 Grad, eines Axialversatzes bis zu 15 mm oder Radialversatzes bis zu 2,8 mm je nach Baugröße.

In der Regel sollen klassische Flanschkupplungen jedoch keine Ausgleichsfunktion übernehmen; entsprechend ungünstig reagieren sie auf störende Biegemomente und Querkräfte, welche durch den Betrieb selbst (z.B. Eigengewicht eines Wellenabschnitts) oder aber durch Ausrichtfehler hervorgerufen werden können /1/. **Bild 1** zeigt exemplarisch einen Schadensfall, der den Anstoß für diese Untersuchungen gab.



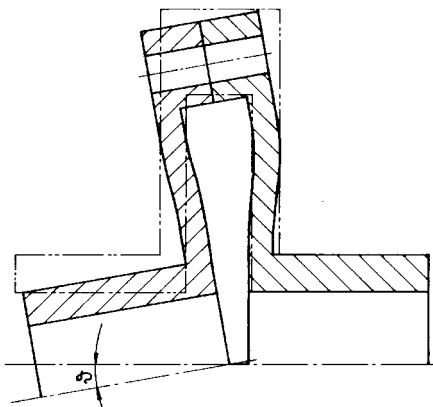
**Bild 2:** Verhältnis von Lochkreisdurchmesser  $k$  zum Wellendurchmesser  $d_w$  genormter Flanschverbindungen und solcher mit Sondermaßen, die im Rahmen der hier beschriebenen Analysen untersucht wurden

In den gültigen Berechnungsgrundlagen werden Biege- und Querkraftbelastungen bisher nicht in ausreichendem Umfang beachtet. Die Festlegung der geometrischen Abmessungen von Flanschkupplungen erfolgt nach DIN 759 und DIN

760 vorrangig anhand des Wellendurchmessers (**Bild 2**). Dabei wird vorausgesetzt, dass Flansch und Hülse ideal starr miteinander gekoppelt sind. Dies trifft jedoch bei Flanschkupplungen größerer Ausführungen (Wellendurchmesser  $d_w > 150$  mm) aufgrund der geringeren Biegesteifigkeit der Flansche nicht zu, so dass Biege- und Schubbeanspruchungen neben der reinen Torsionsbeanspruchung mehr an Bedeutung gewinnen. Um den schadensfreien Betrieb von Flanschkupplungen unter Berücksichtigung dieser zusätzlichen Beanspruchungsgrößen zu garantieren, ist die Entwicklung eines Auslegungskonzeptes, welches die genannten Effekte einschließt, unbedingt notwendig.

Erste Vorschläge hierfür wurden in /1-3/ erarbeitet, wobei sich die durchgeführten Untersuchungen darauf beschränken, den Einfluss der Biegemomente und Querkräfte auf die Leistungsübertragung näher zu beleuchten. Als wesentliche Ergebnisse sind die Bestimmung der Schlupfgrenzfläche sowie eine Bewertung von Steifigkeit und Tragverhalten der Verbindungselemente, wie Schrauben oder Stifte, zu nennen.

Aus Sicht beider Autoren des Artikels ist das Klaffverhalten einer Flanschkupplung nicht das einzige Kriterium für einen schadensfreien Betrieb. Viel wichtiger – und dies besonders bei großen oder bewusst nachgiebig gestalteten Flanschkupplungen – ist der Einfluss der Zusatzbeanspruchungen durch Biegung und Torsion auf die Festigkeit der Einzelkomponenten (Flansch und Hülse). Für die Überprüfung dieser schadensrelevanten Faktoren durch einen analytischen Festigkeitsnachweis existieren bisher keine allgemeingültigen Richtlinien.



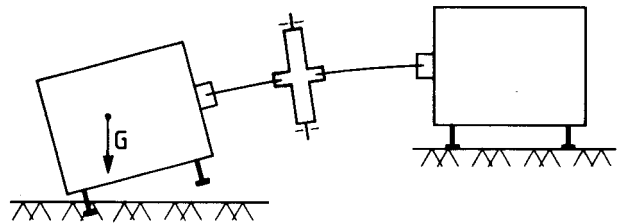
**Bild 3:** Radialverschiebung/Rotation der Flansche während des Betriebs ohne Ablösen im Kontaktbereich

## 2 Numerische Simulationen

Bei Flanschkupplungen großer Abmessungen oder solchen, die bewusst dünnwandig gestaltet wurden, führen radiale Verschiebungen bzw. damit verbundene Winkelrotationen zwischen beiden Flanschen (**Bild 3**) – hervorgerufen durch Querkkräfte oder Biegemomente im Antriebsstrang – zu Biegespannungen in den Flanschen. Diese komplexe Beanspruchungssituation wurde (als Referenz für noch weiterzuentwickelnde analytische Berechnungsansätze) zunächst mit Hilfe von Finite Element Analysen untersucht.

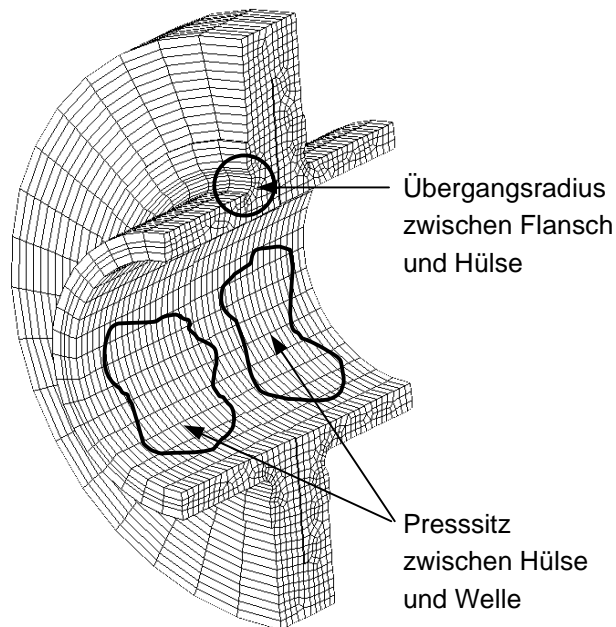
### 2.1 Modellbildung

Bei der Abbildung des kombinierten Belastungszustandes aus statischer Torsion sowie dynamisch wirkender Biegung und Querkraft wurde der kritische Fall betrachtet, dass – verursacht durch Ausrichtfehler im Antriebsstrang – das gesamte Gewicht der Kraftmaschine auf der Flanschkupplung lastet (**Bild 4**). Außerdem war in diesem speziellen Anwendungsfall der Spanndruck einer Schrumpfscheibenverbindung zur Befestigung der Flanschkupplung auf der Welle zu berücksichtigen.

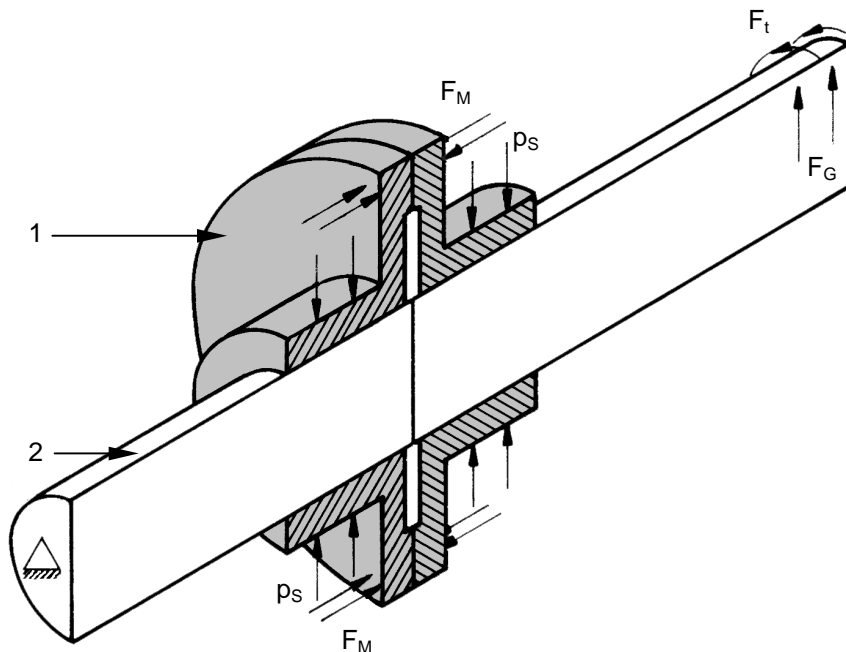


**Bild 4:** Kritischer Fall: Gewicht der Antriebsmaschine wirkt auf die Kupplung

**Bild 5** zeigt den Halbschnitt einer der untersuchten Flanschverbindungen (beide Wellenenden sind ausgeblendet). Die Auswertung der Simulationsrechnungen konzentrierte sich auf die Durchführung eines Festigkeitsnachweises in den dargestellten kritischen Bereichen anhand der FE-Ergebnisse.



**Bild 5:** FEM-Modell beider Flanschhälften (Halbschnittsdarstellung)



**Bild 6:** Gesamtmodell (schematisch) mit den dazugehörigen Randbedingungen

## 2.2 Randbedingungen

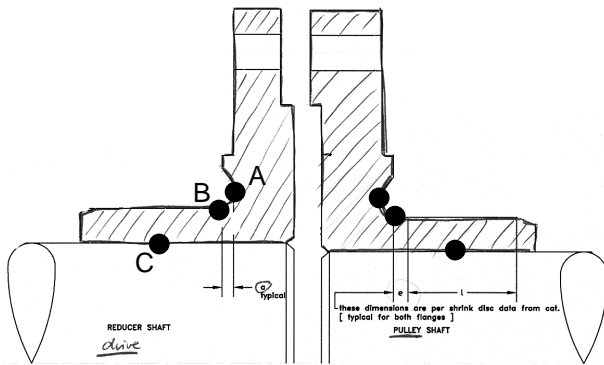
Das Mehrkörper-Kontaktmodell (**Bild 6**) besteht aus den beiden Flanschhälften (1) und den Wellenenden (2), wobei zwischen Flansch und Welle ein passungsbedingtes Spiel modelliert wurde. Die Anbindungen zur Kraft- und Arbeitsmaschine wurden durch entsprechende Rand- und Lastbedingungen wiedergegeben. Im Einzelnen sind folgende Annahmen aufzuzählen:

- das gesamte Getriebegewicht  $F_G$  lastet auf dem Antriebsstrang, die Abstützung durch die Anschlusskonstruktion wird in der Berechnung nicht direkt erfasst,
- die Schrumpfscheiben wurden durch einen radial wirkenden Druck  $p_s$  abgebildet,
- die Schrauben zur Verbindung beider Flanschhälften wurden nicht als Bauteil generiert, sondern durch ihre Vorspannkraft  $F_M$  (verteilt über dem Umfang) ersetzt,
- das Torsionsmoment wird über Tangentialkräfte  $F_t$  am Umfang der Getriebewelle eingeleitet.

## 2.3 Ergebnisse

Der Festigkeitsnachweis für die in **Bild 7** gekennzeichneten kritischen Stellen (Punkt A: Übergangsradius zwischen Flansch und Hülse - flanschseitig, Punkt B: Übergangsradius zwischen Flansch und Hülse - hülsenseitig, Punkt C: Presssitzbereich) erfordert die separate Betrachtung der örtlich wirksamen statischen und dynamischen Beanspruchungsanteile. Im Fall der hier untersuchten Konstruktion sind dies die (statischen) Biege- und Schubspannungen infolge des Presssitzes der Schrumpfscheibe  $p_s$ , die (ebenfalls statischen) Torsionsschubspannungen  $\tau_t$  resultierend aus der Leistungsübertragung sowie die (dynamischen) Biege- und Schubspannungen durch die Gewichtskraft  $F_G$ .

Die Simulationsergebnisse bestätigen den eingangs dargelegten Sachverhalt, wonach insbesondere bei Flanschkupplungen großer Abmessungen die dynamisch wirksamen Beanspruchungen zu einer deutlichen Verringerung der vorhandenen Sicherheiten für eine dauerfeste Auslegung führen. Die Sicherheitsfaktoren wurden durch einen Festigkeitsnachweis auf Basis des für den Werkstoff gültigen Smith-Diagramms ermittelt.



**Bild 7:** Kritische Stellen für den Festigkeitsnachweis

Im untersuchten Spektrum verschiedener Baugrößen, **Tabelle 1** und **Tabelle 2** geben einen Überblick, fallen besonders die Baugrößen 2 und 3 mit – im Vergleich zu den üblichen Werten von 1,5 bis 2 – äußerst geringen Sicherheiten im Bereich B und C (vgl. **Bild 7**) auf, welche mit dem gezeigten Schadensfall (vgl. **Bild 1**) konform gehen.

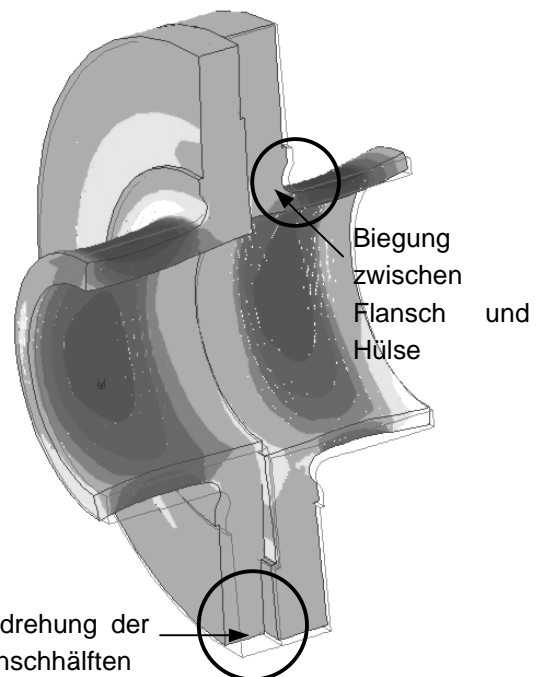
| Baugröße/lfd. Nr.      | 1   | 2   | 3   | 4   | 5   |
|------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|
| Wellendurchmesser [mm] | 250 | 320 | 300 | 190 | 160 |
| Sicherheitsfaktor      | 1,7 | 1,0 | 1,3 | 1,5 | 1,3 |

**Tabelle 1:** FEM-Ergebnisse für den Bereich B

| Baugröße/lfd. Nr.      | 1   | 2   | 3   | 4   | 5   |
|------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|
| Wellendurchmesser [mm] | 250 | 320 | 300 | 190 | 160 |
| Sicherheitsfaktor      | 1,9 | 1,2 | 1,4 | 1,8 | 1,8 |

**Tabelle 2:** FEM-Ergebnisse für den Bereich C

Weiterhin konnte nachgewiesen werden, dass die Vorspannkraft der Flanschverschraubungen bei einigen der untersuchten Verbindungen nicht ausreichte, um ein Verdrehen beider Flanschkhälften zueinander zu verhindern (**Bild 8**). Bei Belastung mit dem Peakmoment wird der Reibschluss teilweise aufgehoben, s.d. die Schrauben als Formschlusselemente wirken. Im praktischen Betrieb ist deshalb auch mit Reibrostbildung in den Kontaktflächen zu rechnen.



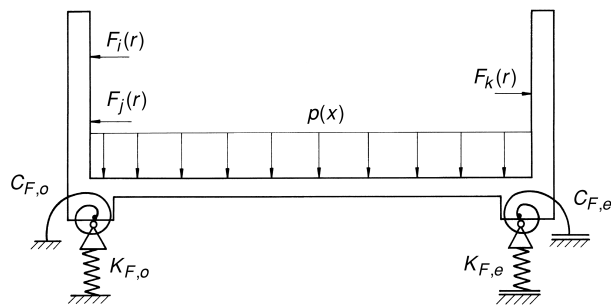
**Bild 8:** Verformung beider Flanschkhälften und deren Verdrehung zueinander

### 3 Analytische Herangehensweise

Für die Entwicklung einer gesicherten Auslegungsrichtlinie, welche den Einfluss von Biege- und Querkraftbelastungen unabhängig von der Flanschbaugröße mit erfasst, bedarf es zahlreicher Parameterrechnungen, wie die Variation der Baugröße, der Lasthöhe, des Werkstoffs u.a., welche mit Hilfe von Finite Elemente Berechnungen nur unter hohem Zeitaufwand zu realisieren sind. Im Gegensatz hierzu ist die Erarbeitung eines geschlossenen analytischen Berechnungsansatzes zügiger zu realisieren und verspricht letztlich auch exaktere Ergebnisse als die empirische Methode.

Ausgehend von den Erfahrungen beider Autoren bei der Berechnung rotationssymmetrischer Bauteile unter symmetrischen und unsymmetrischen Belastungen wurden erste Überlegungen „zu Papier gebracht“, die von einem gekoppelten Modell mechanischer Grundelemente ausgehen. Eine vergleichbare Herangehensweise wurde bereits bei der Dimensionierung von Seiltrommeln angewendet /4/, welche von ihrer mechanischen Grundstruktur, nämlich der Kopplung von Schalen und Plattenelementen, dem Aufbau der Flanschkupplungen entsprechen. **Bild 9** zeigt das mechanische Ersatzmodell einer Seiltrommel, welches die Beanspruchungsgrößen

des schalenförmigen Mantels mit denen der plattenförmigen Bordscheibe verbindet.



**Bild 9:** Mechanisches Ersatzbild einer Seiltrommel /4/

Die Herausforderung der weiteren Arbeit besteht in der Auswahl und Einarbeitung geeigneter Rand- und Übergangsbedingungen, die eine möglichst realistische Wiedergabe des Gesamtverhaltens verschiedenartig gestalteter Flanschkupplungen ermöglichen.

#### 4 Literatur

- /1/ Gerber, H.: Statisch überbestimmte Flanschverbindungen mit Reib- und Formschlußelementen unter Torsions-, Biege- und Querkraftbelastung. Dissertation, Berlin, 1991
- /2/ Kurzawa, T.: Gestaltung und Berechnung von nichtsaltbaren reibschlüssigen Flanschkupplungen. Dissertation, Berlin, 1993
- /3/ Michligk, T.: Statisch überbestimmte Flanschverbindungen mit gleichzeitigem Reib- und Formschluß. Dissertation, Berlin, 1988
- /4/ Mupende, I.: Beanspruchungs- und Verformungsverhalten des Systems Trommelmantel – Bordscheiben bei mehrlagig bewickelten Seiltrommeln unter elastischem und teilplastischem Werkstoffverhalten, Dissertation, Curvillier Verlag, Göttingen, 2001



# Innenhochdruckgefügte Welle - Nabe - Pressverbindung

Deimel, M.; Dietz, P.; Grünendick, T

Pressverbindungen gehören zu den grundlegenden Verbindungselementen der Antriebstechnik. Die Herstellung innenhochdruckgefügter Welle-Nabe-Verbindungen zeichnet sich im Gegensatz zu konventionellen Fügeverfahren (z. B. thermisches Querpresse und Längspresse) dadurch aus, dass die zu fügenden Durchmesser große Toleranzen aufweisen können. Zum Ermitteln der axialen Passfugendruckverteilung liegt derzeit noch kein analytisches Berechnungsverfahren vor. Während des Fügeprozesses ist die Welle nur in einem geringen Bereich ihrer Axialausdehnung belastet, so dass zur ganzheitlichen Analyse mechanische Kopplungen sowohl der belasteten und unbelasteten Wellenbereiche als auch von Welle und Nabe notwendig sind. Die Autoren stellen zunächst ein Verfahren vor, mit dem die Kopplung in ein lineares Übertragungssystem überführt wird. Auf der Basis dieses Übertragungssystems lässt sich unter Berücksichtigung des plastischen Verhaltens der Welle eine geschlossene Lösung für den Passfugendruckverlauf angeben.

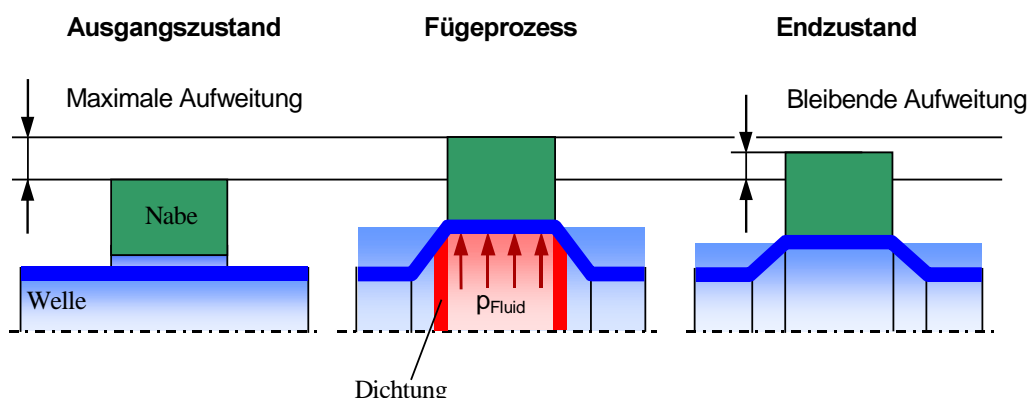
Force fits are part of the fundamental connecting elements in drive technology. The production of internal high pressure jointed shaft-hub connections is characterized by high tolerances of the joining diameters in contrast to conventional joining processes (e. g. thermal radial and axial force fits). At present an analytical method of calculation to determine the axial distribution of fitting joint pressure does not exist. During the joining process the shaft is loaded in a small range of its entire length. For this reason a holistic analysis requires mechanical couplings of the loaded and unloaded ranges of the

shaft as well as of the shaft and the hub. First, the authors present a method to transform the coupling to a linear transmission system. Based on this system a closed solution for the distribution of fitting joint pressure is given in consideration of the shafts plasticity.

## 1 Einleitung

Welle-Nabe-Pressverbindungen haben durch die konstruktive Ankopplung an benachbarte Aggregate eine herausragende Stellung und eine nachgewiesene hohe Akzeptanz im Maschinen- und Anlagenbau. Neben den klassischen Pressverbindungen bildet die innenhochdruckgefügte Welle-Nabe-Verbindung ein neuartiges Teilgebiet der Maschinenelemente. Der geringe Fertigungs- und Montageaufwand, die gute Reproduzierbarkeit der Verbindungsqualität und die kerbspannungsarme Ausführung der innenhochdruckgefügten Welle-Nabe-Verbindung sind die wesentlichen Vorteile dieses Verfahrens und zeigen das hohe Entwicklungspotenzial. Innenhochdruckgefügte Pressverbindungen kommen z. Z. vorrangig zum Fertigen von PKW-Nockenwellen, Ausgleichswellen und Befestigen von Ketten- oder Riemenrädern zum Einsatz.

Bedeutend für einen optimalen Einsatz unter technologisch-wirtschaftlichen Gesichtspunkten ist die Kenntnis der Beanspruchungen, die sich in Welle und Nabe einstellen. In Bezug auf die Drehmomentübertragungsfähigkeit ist die Höhe des sich nach dem Fügen zwischen Welle und Nabe einstellenden Passfugendrucks entscheidend.



**Bild 1:** Phasen des Fügeprozesses /1/

$$w(x) = e^{-\kappa x} (C_1 \sin \kappa x + C_2 \cos \kappa x) + e^{\kappa x} (C_3 \sin \kappa x + C_4 \cos \kappa x) + \frac{p_i}{4\kappa^4 K_{11}}, \quad (1)$$

$$\kappa = \frac{1}{\sqrt{ah}} \sqrt{3 \left( \frac{E_{\vartheta}}{E_x} - \nu_{\vartheta x}^2 \right)}, \quad K_{11} = \frac{h^3 E_x}{12(1 - \nu_{x\vartheta} \nu_{\vartheta x})},$$

$$\psi_x(x) = \begin{cases} -\kappa e^{-\kappa x} [\cos \kappa x ((C_1 - C_2) + e^{2\kappa x} (C_3 + C_4))] + \\ + \kappa e^{-\kappa x} [\sin \kappa x ((C_1 + C_2) + e^{2\kappa x} (C_4 - C_3))] \end{cases} \quad (2)$$

$$w_N(x) = (H_1 e^{-\varphi x} + H_2 e^{\varphi x}) \sin \omega x + (H_3 e^{-\varphi x} + H_4 e^{\varphi x}) \cos \omega x + \frac{p_i}{\mu_2 \delta_1}, \quad (3)$$

$$\psi_{xN}(x) = \begin{cases} -e^{\varphi x} [\cos \omega x (H_2 \omega + H_4 \varphi + e^{-2\varphi x} (H_1 \omega - H_3 \varphi))] + \\ + e^{\varphi x} [\sin \omega x (H_4 \omega - H_2 \varphi + e^{-2\varphi x} (H_1 \varphi + H_3 \omega))] \end{cases} \quad (4)$$

$$\varphi, \omega = f(a_N, \Delta h_i, E_{\parallel}, E_{\perp}, \nu_{\parallel\perp}, \nu_{\perp\parallel}, \alpha_i),$$

$$\begin{bmatrix} T_{11} & T_{12} & T_{13} & T_{14} \\ T_{21} & T_{22} & T_{23} & T_{24} \\ T_{31} & T_{32} & T_{33} & T_{34} \\ T_{41} & T_{42} & T_{43} & T_{44} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} M_I \\ M_{II} \\ R_I \\ R_{II} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -p_i / (4\kappa^4 K_{11}) \\ -p_i / (4\kappa^4 K_{11}) \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}.$$

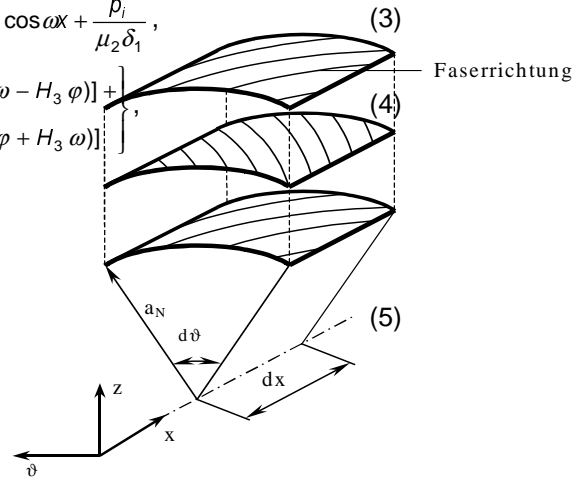
## 2 Prinzip des Innenhochdruckfügens

Die Fügepartner Hohlwelle und Nabe besitzen vor dem Fügen im Gegensatz zu konventionellen Querpress- und Längspressverbänden ein Spiel,

d. h. der Bohrungsdurchmesser der Nabe ist geringfügig größer als der Außendurchmesser der Welle. Nach dem Ausrichten der Welle in der Nabe dichtet ein Aufweitwerkzeug die Welle im Bereich der Nabe ab und führt dem abgedichteten Bereich ein Fluid hohen Drucks zu. Dadurch weitet sich die Welle lokal unterhalb der Nabe auf. Ist das Fügespiel überwunden, legt sich die Welle an die Nabe an. Bei Erhöhen des Drucks expandieren Welle und Nabe gemeinsam, wobei die Welle ihre elastische Grenzlaster überschreitet und sich plastisch verformt. Nach Druckrücknahme des Fluids federn Welle und Nabe elastisch zurück. Bei unterschiedlichen Nachgiebigkeiten und Streckgrenzen sind die Rückdehnungen der Bauteile unterschiedlich. Ist die Rückdehnung der Nabe größer als die der Welle, verspannen sich Welle und Nabe und bilden eine kraftschlüssige Verbindung aus (Bild 1).

## 3 Mechanische Modelle von Welle und Nabe

Durch das Fügen wird die Welle nur im Bereich der Nabe mit einem Innendruck beaufschlagt. Um sowohl die mechanische Kopplung des mit Innenhochdruck belasteten Bereichs mit den unbelasteten Bereichen der Welle als auch das



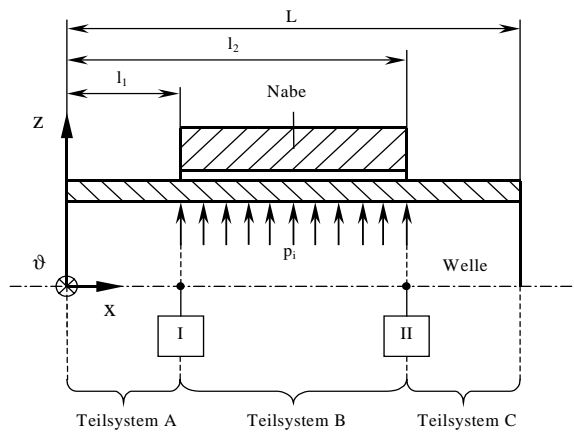
**Bild 2:** Aufbau einer Mehrschichtverbund-Nabe

Aufweiten des Systems Welle-Nabe zu untersuchen, bietet sich die geschlossene Kreiszylinderschale als mechanisches Modell für Welle und Nabe an.

Mit den Vereinfachungen der Schalentheorie /2, 3/ lässt sich der Spannungszustand in der Welle bei Innendruckbelastung als ein zweiachsiger Hauptspannungszustand abbilden. Der Wellenwerkstoff erfährt durch den Rohrherstellungsprozess in Umfang- und Längsrichtung unterschiedliche Kristallausrichtungen, so dass dieser in den drei Richtungen des (x, phi, z)-Koordinatensystems orthotropes Verhalten aufweist. Für die Radialaufweitung der orthotropen Welle gilt Gleichung (1), /3/.

Die Biegeverdrehung der Welle um die phi-Achse berechnet sich zu Gl. (2), /4/.

Im Gegensatz zur Welle wird die Nabe als ein Faserverbundbauteil aufgefasst. Sie ist aus unidirektionalen Einzelschichten als Mehrschichtverbund aufgebaut (Bild 2). Durch die Möglichkeit, die Einzelschichten unterschiedlich auszurichten, kann ein auf die speziellen Anforderungen abgestimmtes mechanisches Verhalten des Mehrschichtverbundes realisiert werden.



**Bild 3:** In Teilsysteme gegliederte Welle-Nabe-Verbindung

Zur Verzerrungs- und Beanspruchungsanalyse der Faserverbund-Nabe lassen sich im Prinzip die Herleitungen der homogenen Zylinderschale nach der Schalentheorie verwenden, wobei zusätzlich die Voraussetzungen der klassischen Laminattheorie zu erfüllen sind /5, 6/.

Für die Radialaufweitung und die Biegeverdrehung um die  $\vartheta$ -Achse folgt für die Nabe die Gl. (3) und (4).

#### 4 Übergangskopplung mit dem Kraftgrößenverfahren

Die unstetig belastete Welle ist auf drei Teilsysteme, von denen zwei unbelastet und eines konstant belastet ist, zurückzuführen. Angenommen wird, dass der Fügebereich die gleiche Länge wie die Nabe hat (Bild 3).

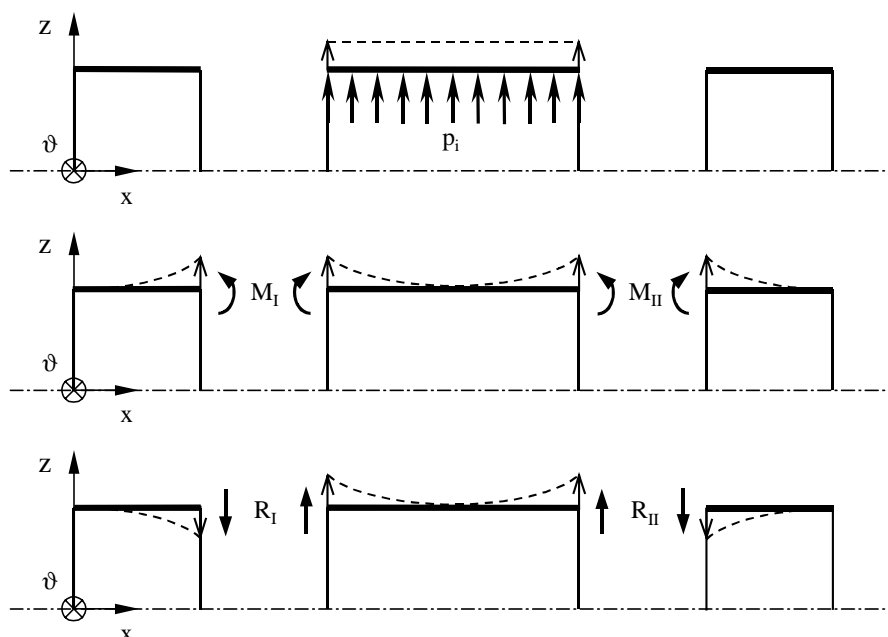
Da das Ändern der Steifigkeit eines der Teilsysteme der Welle bzw. der Nabe die Beanspruchungsverteilung im gesamten Welle-Nabe-System ändert, ist eine mechanische Kopplung aller Einzelflächentragwerke vorzunehmen. Als Berechnungsverfahren für die zusammengesetzten Schalen wird das Kraftgrößenverfahren /2/ angewandt. Das nur für den elastischen Bereich gültige Verfahren basiert darauf, dass das mechanisch unbestimmte System in statisch bestimmte Belastungssysteme durch Freischneiden an den Positionen I und II zerlegt wird.

Mit der Vereinfachung, dass die Wanddicke der Hohlwelle viel kleiner als der mittlere Radius ist, ist der Druckunterschied zwischen der elastischen Grenzlast und dem Druck, bei dem die Welle im Fügebereich vollständig plastiziert, zu vernachlässigen. Es lassen sich damit hinsichtlich des Verformungsverhaltens der Welle zwei Fälle unterscheiden:

- Die Welle plastiziert vor dem Anlegen an die Nabe vollständig,
- Die Welle legt sich elastisch an die Nabe an.

##### 4.1 Kopplung der Teilsysteme der Welle

Da sich die Welle bis zum vollständigen Plastizieren ohne Nabeneinfluss ausdehnt, ist zunächst das Übertragungssystem allein für die Welle aufzubauen. Durch die festen Verbindungen der Teilsysteme A, B und C an den Stellen I und II müssen an jedem Schnittufer die Radialverformung



**Bild 4:** Mechanisches Modell der zusammengesetzten Welle, gestrichelte Linien: Radialverformung und Biegeverdrehung durch Randschnittgrößen

$$w_{WN}(x) = \left\{ \begin{array}{l} e^{r(l_1-x)}(U_1 \sin r x + U_2 \cos r x) + \\ + e^{-r(l_2-x)}(U_3 \sin r x + U_4 \cos r x) + \frac{p_i}{4r^4 K_{11}} \end{array} \right\}, \quad (6)$$

$$r = \sqrt[4]{k^4 + \frac{\mu_2 \delta_1}{4K_{11}}}, \quad \mu_2, \delta_1 = f(a_N, \Delta h_i, E_{||i}, E_{\perp i}, v_{||i}, v_{\perp i}, \alpha_i).$$

$$\begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} & S_{14} \\ S_{21} & S_{22} & S_{23} & S_{24} \\ S_{31} & S_{32} & S_{33} & S_{34} \\ S_{41} & S_{42} & S_{43} & S_{44} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} M_I \\ M_{II} \\ R_I \\ R_{II} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -p_i/(4r^4 K_{11}) \\ -p_i/(4r^4 K_{11}) \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (7)$$

und Biegeverdrehung gleich sein. Diese Kontinuität der Formänderung erzwingt an einem Schnittufer gleiche Randkräfte und Randmomente (Bild 4).

Da die Radialaufweitung und Biegeverdrehung von zwei Wellenbereichen eines Schnittufers gleich sind, lassen sich für die gesamte Welle vier Kompatibilitätsbedingungen herleiten. Setzt man die Gl. (1) und (2) für jedes Wellen-Teilsystem in die Kompatibilitätsbedingungen ein und drückt die Integrationskonstanten durch die Randquerkräfte  $R_I$ ,  $R_{II}$  und die Randbiegemomente  $M_I$ ,  $M_{II}$  aus, resultiert daraus das lineare Gleichungssystem (5).

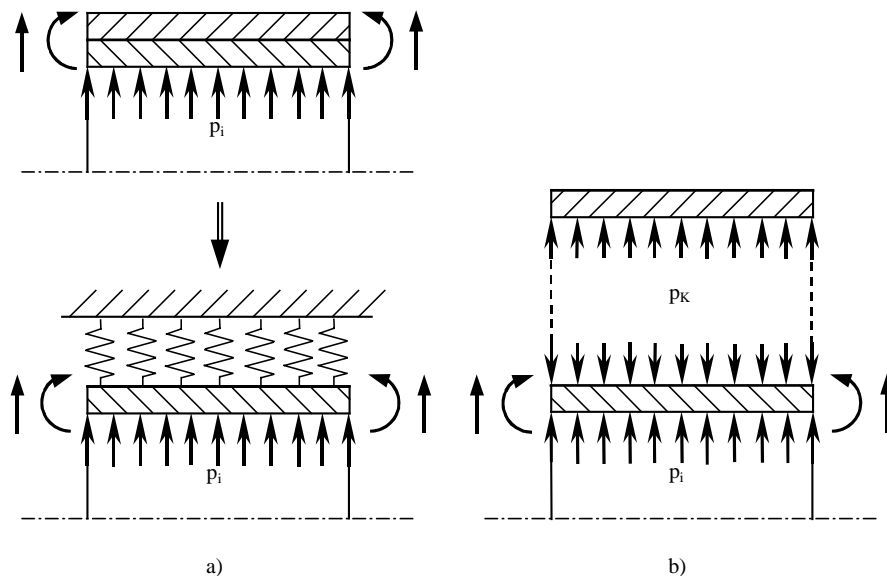
Die durch Lösen des Gleichungssystems zu berechnenden Randstörgrößen  $R_I$ ,  $R_{II}$ ,  $M_I$  und  $M_{II}$  hängen von den Matrixelementen  $T_{ij}$  ab, die wiederum Funktionen der Teilsystemlängen, der Wellendicke, des Mittenradius, der Elastizitätsmoduln und der Querkontraktionszahlen der Welle sind. Neben den Verformungen lassen sich damit auch die Beanspruchungen der Welle in Abhängigkeit der Geometrie- und Werkstoffparameter untersuchen.

## 4.2 Kopplung der Teilsysteme der elastischen Welle und Nabe

Das Fügenspiel von Welle und Nabe ist bei dieser Kopplungsvariante so gering, dass sich die Welle vor Erreichen der elastischen Grenzlast an die Nabe anlegt. Die Nabe behindert dadurch die Wellenverformung. Der Verformungswiderstand beschreibt sich näherungsweise als ein konstanter, zwischen Welle und Nabe herrschender Kontaktdruck (Bild 5).

Die Radialaufweitung der elastischen Welle-Nabe-Kopplung leitet sich unter der Annahme, dass sich Welle und Nabe gleich radial aufweiten, her. Gleichung (6) beschreibt somit die gemeinsame Radialaufweitung beider Bauteile bis zum Erreichen des Plastizierungsdrucks.

Das Übertragungssystem ist analog Abschnitt 4.1 mit den Kompatibilitätsbedingungen aufzustellen, jedoch ist das Wellensegment im Bereich B durch die elastische Welle-Nabe-Kopplung zu ersetzen.



**Bild 5:** a) Verformungswiderstand der Welle durch die Nabe, b) Ersatzmodell mit Kontaktdruck

Für die Randstörgrößen gilt mit den Gl. (3), Gl. (4) und Gl. (6) das Gleichungssystem (7).

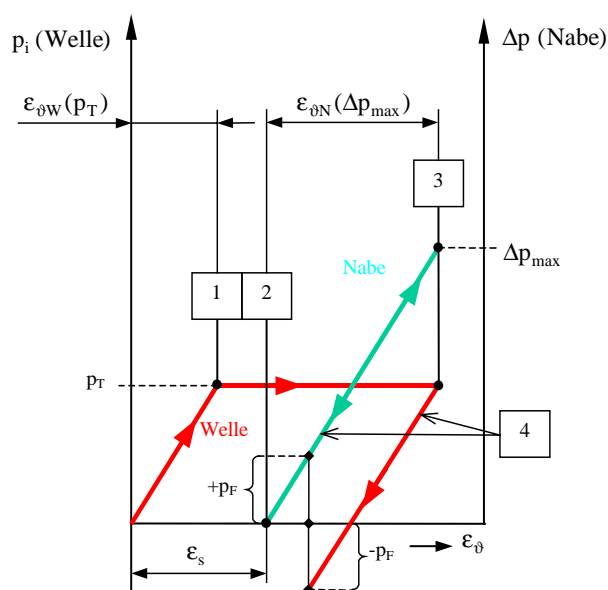
Die Matrixelemente  $S_{ij}$  sind Funktionen der Längen, der Dicke bzw. Schichtdicken, des Mittenradius, der Elastizitätsmoduln und der Querkontraktionszahlen von Welle und Nabe.

## 5 Plastizität der Welle

Zum Bestimmen des Passfugendrucks ist es notwendig, den Druck zu bestimmen, bei dem die Welle im Bereich B entlang der Wanddicke vollständig plastiziert [1]. Dieser Druck wird nach dem Traglastverfahren berechnet [7].

Für den Plastizierungsdruck der Welle ohne Einfluss der Nabe gilt unter Anwenden der modifizierten Huber-von-Mises-Hencky-Fließbedingung [8] für orthotrope, elastisch-idealplastische Werkstoffe Gl. (8).

Bei Betrachtung der elastischen Welle-Nabe-Kopplung bewirkt der Steifigkeitseinfluss der Nabe, dass ein bestimmter Verformungs- und damit Spannungszustand im Vergleich zur Wellenausdehnung ohne Nabe einen höheren Innendruck voraussetzt. Somit ist auch die Fließbedingung erst bei einem höheren Innendruck erfüllt. Der Druck, bei dem die Welle in der Welle-Nabe-Kopplung plastiziert, ist damit höher als der entsprechende Druck ohne Einfluss der Nabe. Für den Plastizierungsdruck der Welle-Nabe-Kopplung gilt unter Berücksichtigung des wirkenden Kontaktdrucks Gl. (9).



**Bild 6:** Druck-Dehnungs-Schaubild der Kopplung von plastischer Welle und elastischer Nabe

Die Konstanten  $Y_{1-3}$  und  $Z_{1-3}$  lassen sich aus dem Gleichungssystem (5) bzw. (7) berechnen, indem man die Koeffizienten des Innendrucks  $p_i$  für die Randschnittgrößen  $M_i$ ,  $M_{ii}$  und  $R_i$  ermittelt.

## 6 Passfugendruck

Die sich nach der Druckrücknahme einstellende Passfugendruckverteilung lässt sich aus den Umfangsdehnungen von Welle und Nabe als Funktion der Längskoordinate  $x$ , dem Plastizierungsdruck der Welle und dem oberen Grenzfugedruck herleiten. Die Berechnungen leiten sich dabei aus Druck-Dehnungs-Diagrammen ab.

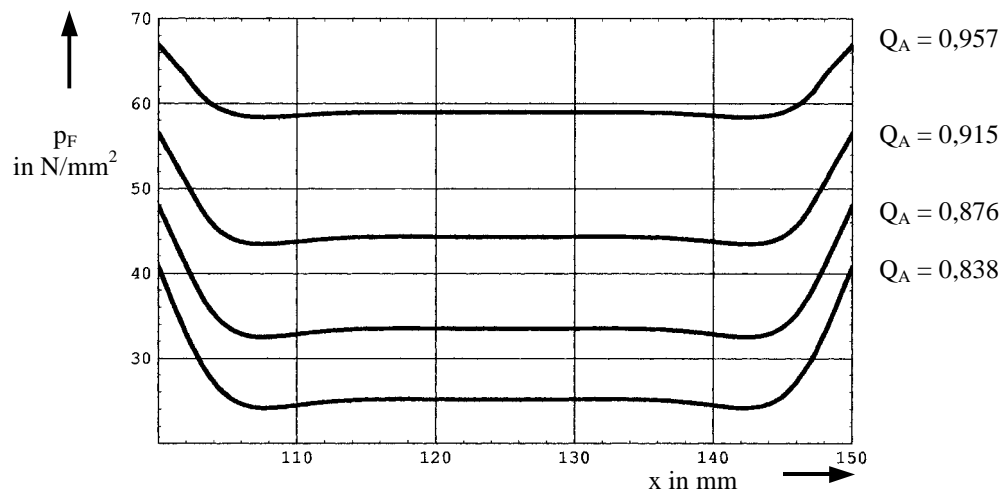
### 6.1 Kopplung von plastischer Welle und elastischer Nabe

Durch den anliegenden Innendruck  $p_i$  weitet sich die Welle radial auf und plastiziert vor dem Anlegen an die Nabe vollständig im Bereich B (vgl. Punkt 1 in Bild 6). Die Welle schmiegt sich im plastischen Zustand an die Nabe an (Punkt 2). Bei weiterer Druckzunahme dehnen sich plastische Welle und elastische Nabe nach den Annahmen der Schalentheorie mit gleicher Umfangsdehnung. Da die Welle im plastischen Zustand nicht zur Steifigkeit des Systems Welle-Nabe beiträgt, entspricht das Dehnungsverhalten der Welle-Nabe-Kopplung für  $p_i > p_T$  dem Dehnungsverhalten der Nabe ohne Welleneinfluss. Der Innendruck wirkt auf die plastische Welle, die wiederum einen Kontaktdruck auf die Nabe ausübt. Da die Welle erst nach Erreichen des Plastizierungsdrucks mit der Nabe in Kontakt tritt, lässt sich der Kontaktdruck durch den Differenzdruck  $\Delta p = (p_i - p_T)$  annähern. Nach Erreichen des maximalen Fügedrucks bzw. der maximalen Druckdifferenz auf die Nabe  $\Delta p_{\max}$  (Punkt 3) wird der Innendruck zurückgenommen und beide Bauteile kontrahieren gemäß ihrer Elastizitätskennlinie (Bereich 4).

Es bildet sich dann eine kraftschlüssige Verbindung aus, wenn die bleibende Dehnung der Welle die vollständige Rückverformung der Nabe verhindert. Der zwischen den Bauteilen entstehende Kontaktdruck nach Druckrücknahme ist der Passfugendruck  $p_F$ .

Die Rückdehnungen  $\varepsilon_{\phi W}$  und  $\varepsilon_{\phi N}$  von Welle bzw. Nabe sind rein elastisch und damit gleich den Dehnungen aus dem unbelasteten Zustand der Bauteile bis zum Druck  $p_T$  bzw.  $\Delta p$ . Mit der Annahme, dass der Druck  $p_T$  der elastischen





**Bild 8:** Passfugendruck in Abhängigkeit des Nabendurchmesserverhältnisses,  $Q_1 = 0,85$ ,  $l_1 = 100$  mm,  $l_2 = 150$  mm,  $L = 250$  mm,  $p_{i\max} = 100$  N/mm<sup>2</sup>,  $\Delta p_{\max} = 80$  N/mm<sup>2</sup>, Welle: Stahl,  $E_x = E_\varnothing = 210000$  N/mm<sup>2</sup>,  $\nu_{\varnothing x} = \nu_{x\varnothing} = 0,3$ ,  $\sigma_F = 300$  N/mm<sup>2</sup>, Nabe: FVW, T 400/Fibredur 6376 mit 60% Faservolumen,  $n = 8$ ,  $\alpha_{1-8} = 90^\circ$ ,  $\Delta h_{1-8} = 0,25$  mm,  $E_\perp = 9140$  N/mm<sup>2</sup>,  $E_{||} = 137200$  N/mm<sup>2</sup>,  $\nu_{\perp||} = 0,019$ ,  $\nu_{||\perp} = 0,29$

Durchmesserverhältnissen bzw. Längenbereichen außerhalb der Fügezone, der Fügelänge, dem Fügedruck und den oberen Belastungsgrenzwerten von Welle und Nabe ermitteln und grafisch darstellen. Die analytischen Ergebnisse wurden mit Hilfe umfangreicher FEM-Simulationen verifiziert.

Bild 8 zeigt beispielhaft die Abhängigkeit des Passfugendrucks von dem Nabendurchmesserverhältnis  $Q_A$  bei Kopplung von plastischer Welle und elastischer Nabe.

## 7 Zusammenfassung

Das Verfahren zeigt, dass eine analytische Berechnung der Passfugendruckverteilung einer innenhochdruckgefügtten Welle-Nabe-Verbindung möglich ist. Der Rechnung liegt ein Übertragungssystem zwischen zusammengesetzter Hohlwelle und Nabe zu Grunde, das es erlaubt, die Einflüsse der Einzelelemente auf das Welle-Nabe-System zu untersuchen. Die Ergebnisse wurden in eine Berechnungssoftware umgesetzt und durch FEM-Simulationen verifiziert.

Um dem Leichtbaucharakter der Verbindungstechnik Rechnung zu tragen, wurde neben Stahl als Wellen- und Nabenwerkstoff schwerpunktmäßig die Kombination von Stahl-Welle mit Faserverbund-Nabe analysiert.

Die Rechnungen sind durch die verwendete Schalentheorie nur auf dünnwandige Bauteile anzuwenden, jedoch erlaubt die Theorie durch das

Vernachlässigen der Spannung in Dickenrichtung eine Übergangskopplung.

## 8 Literatur

- /1/ Grünendick, T.: Das „hydraulische Aufweiten“ im neuen Gewand – IHF sorgt für festen Presssitz -. In: IMW-Institutsmitteilung Nr. 26 (2001), TU Clausthal
- /2/ Schnell, W.; Eschenauer, H.: Elastizitätstheorie II: Schalen. 1. Aufl. Mannheim: B. I.-Wissenschaftsverlag, 1984
- /3/ Flügge, W.: Statik und Dynamik der Schalen. 3. Aufl. Berlin: Springer, 1981
- /4/ Uhrig, R.: Elastostatik und Elastokinetik in Matrixschreibweise. 1. Aufl. Berlin: Springer, 1973
- /5/ Hermann, A. S.: Vorlesung Mechanik der Faserverbundwerkstoffe I. Technische Universität Clausthal, 1996
- /6/ Pestel, E.; Wittenburg, J.: Technische Mechanik, Band 2: Festigkeitslehre. 1. Aufl. Mannheim: B.-I.-Wissenschaftsverlag, 1981
- /7/ Reckling, K.-A.: Plastizitätstheorie und ihre Anwendung auf Festigkeitsprobleme. 1. Aufl. Berlin: Springer, 1967
- /8/ Hill, R.: The mathematical theory of plasticity. Oxford: Clarendon Press, 1950

|                           |                      |  |             |                          |   |
|---------------------------|----------------------|--|-------------|--------------------------|---|
| <b>9</b>                  | <b>Indizes</b>       |  | $\psi_x$    | rad                      | Biegeverdrehung um die $\vartheta$ -Achse                                     |
| B                         |                      | Teilsystem B der Welle   |             |                          |   |
| i                         |                      | i-te Laminatschicht  | $Q_A$       | -                        | Nabendurchmesser-<br>verhältnis   |
| max                       |                      | maximal  |             |                          |   |
| N                         |                      | Nabe   | $Q_l$       | -                        | Wellendurchmesser-<br>verhältnis  |
| $\vartheta$               |                      | $\vartheta$ -Richtung  |             |                          |   |
| W                         |                      | Welle  | R           | N/mm                     | Randquerkraft je<br>Längeneinheit   |
| WN                        |                      | Welle-Nabe-Kopplung  |             |                          |   |
| x                         |                      | x-Richtung   | S           | mm/N, mm <sup>2</sup> /N | Übergangsmatrix der<br>elastischen Welle-Nabe-<br>Kopplung                    |
| z                         |                      | z-Richtung   |             |                          |   |
|                           |                      | parallel zur Faser   |             |                          |   |
| ⊥                         |                      | senkrecht zur Faser  | s           | mm                       | Fügespiel   |
|                           |                      |  | $\sigma_F$  | N/mm <sup>2</sup>        | Fließspannung   |
|                           |                      |  | T           | -                        | Übergangsmatrix der<br>Kopplung von plastischer<br>Welle und elastischer Nabe |
| <b>10</b>                 | <b>Formelzeichen</b> |  |             |                          |   |
| a                         | mm                   | Mittenradius   |             |                          |   |
| $\alpha$                  | °                    | Faserwinkel  | $U_k$       | mm                       | Integrationskonstanten  |
| $\alpha_{ij}$             | -                    | Anisotropieparameter   | $\vartheta$ | rad                      | Drehwinkel  |
| $C_k$                     | mm                   | Integrationskonstanten   | w           | mm                       | Radialaufweitung  |
| $\varepsilon_S$           | -                    | Halbes Fügespiel bezogen<br>auf den Mittenradius   |             |                          |   |
| $\varepsilon_{\vartheta}$ | -                    | Umfangsdehnung   |             |                          |   |
| E                         | N/mm <sup>2</sup>    | Elastizitätsmodul  |             |                          |   |
| $H_k$                     | mm                   | Integrationskonstanten   |             |                          |   |
| h                         | mm                   | Wanddicke der Welle  |             |                          |   |
| $\Delta h$                | mm                   | Schichtdicke einer Laminat-<br>schicht   |             |                          |   |
| L                         | mm                   | Gesamtlänge der Welle  |             |                          |   |
| $l_1$                     | mm                   | Länge des Teilsystems A<br>der Welle   |             |                          |   |
| $l_2$                     | mm                   | Länge der Teilsysteme A<br>und B der Welle   |             |                          |   |
| M                         | N                    | Randbiegemoment je<br>Längeneinheit  |             |                          |   |
| n                         | -                    | Gesamtschichtzahl der<br>Nabe  |             |                          |   |
| v                         | -                    | Querkontraktionszahl   |             |                          |   |
| $p_F$                     | N/mm <sup>2</sup>    | Passfugendruck   |             |                          |   |
| $p_i$                     | N/mm <sup>2</sup>    | Innendruck   |             |                          |   |
| $p_T$                     | N/mm <sup>2</sup>    | Plastifizierungsdruck der<br>Welle ohne Nabeneinfluss                                    |             |                          |   |
| $p_T^*$                   | N/mm <sup>2</sup>    | Plastifizierungsdruck der<br>Welle-Nabe-Kopplung   |             |                          |   |
| $p_T^{**}$                | N/mm <sup>2</sup>    | Plastifizierungsdruck der<br>Welle-Nabe-Kopplung als<br>Funktion des Fügespiels          |             |                          |   |
| $\Delta p$                | N/mm <sup>2</sup>    | Druckbelastung der Nabe<br>bei Kopplung von<br>plastischer Welle und<br>elastischer Nabe |             |                          |   |
| $\Delta p^*$              | N/mm <sup>2</sup>    | Druckbelastung der Nabe<br>bei elastischer Welle-Nabe-<br>Kopplung                       |             |                          |   |



## Engineering Workflow auf Basis eines objektorientierten Produktmodells

Goltz, M.

*Bedarfsgerechte Kommunikation und Zugang zu entscheidungsbestimmenden Informationen sind Schlüsselfaktoren für eine erfolgreiche Produktentwicklung. Die Koordination komplexer Entwicklungsprojekte erfordert es, Ordnung in das ‚kreative Chaos‘ der Konstruktion zu bringen. Klassische Ansätze des Prozessmanagements versagen hierbei aber aufgrund der Vielzahl von Einflussfaktoren. Der folgende Artikel stellt ein Konzept eines Engineering Workflows auf Basis vernetzter Entwicklungsobjekte innerhalb eines dreistufigen Produktmodells vor. Ein wesentliches Ziel ist dabei die Einbindung von Kunden und Lieferanten in den gesamten Entwicklungsprozess – ausgehend von der Anforderungsermittlung bis hin zu Änderungsprozessen.*

*Communication on demand and access to information decisive for decisions are key success factors in product design. The co-ordination of complex development projects demands control over the ‘creative chaos’ in product design. Conventional approaches of process management fail due to the large number of influencing factors. The following article introduces a concept for an Engineering Workflow based on networked design objects in a three-level object-oriented product model. The concept is focusing on the integration of customers and suppliers all along the product design process – starting from the requirements determination to the management of change processes.*

### 1 Der Konstruktionsprozess – kreatives Chaos ohne Prozessmanagement?

Aus der Sicht einer gezielten Prozesssteuerung, die jederzeit in der Lage ist, den aktuellen Entwicklungsstand sowie noch ausstehende Aktivitäten zu ermitteln, muss diese Frage mit „ja“ beantwortet werden, da die Vielzahl der Einflussfaktoren auf den Entwicklungsprozess die Planbarkeit erheblich erschwert. Verstärkt wird dieses noch durch den Widerspruch der Produktentwicklung, einerseits dem Konstrukteur ein Arbeitsumfeld mit maximaler Freiheit zur Ausarbeitung einer Lösung zur Verfügung zu stellen, und andererseits möglichst genaue

Kenntnisse über Art und Umfang der Aufgaben zu erlangen. Zudem handeln Entwicklungsingenieure häufig auf Basis unscharfer Informationen. Ungenaue Zielvorgaben, konkurrierende Optimierungsziele und nicht abgesicherte Zwischenergebnisse vorangegangener Prozessschritte erfordern vielfach Iterationen, bei denen nicht zwingend die gleichen Arbeitsfolgen durchlaufen werden. Vielmehr wird der nächste Prozessschritt durch die Art und Qualität der verfügbaren Informationen bestimmt, wodurch die Definition standardisierter Prozesse zusätzlich erschwert wird.

Bisherige Lösungsversuche haben gezeigt, dass feste Abläufe entweder auf sehr hohem Abstraktionsniveau oder bei sehr in die Tiefe gehender Detaillierung definiert werden können. Ein hohes Abstraktionsniveau entspricht in den meisten Fällen der Projektmanagementebene. Die Produktentwicklung wird in Teilprojekte und Arbeitspakete zerlegt, wobei jedoch die Verwaltung von Budgets und Ressourcen im Vordergrund steht. Abläufe, die auf dieser Ebene definiert werden können, bieten so gut wie keine Unterstützung für die tägliche Arbeit. Als weiteres Beispiel für einen hohen Abstraktionsgrad sei an dieser Stelle die Zertifizierung nach ISO 9000 angeführt. Während die Prozesse im kaufmännischen und produktiven Bereich sehr gut dokumentiert sind, finden sich im Bereich der Produktentwicklung häufig nur Angaben zu Meilensteindefinitionen oder Freigabeabläufen.

Begibt man sich jedoch auf ein sehr hohes Detaillierungsniveau, ist es durchaus möglich, Standardabläufe für die Entwicklung einzelner Produktkomponenten<sup>1</sup> zu bestimmen. Als Entscheidungskriterium können verschiedene Eigenschaften dienen, wie z.B. Herstellungsverfahren, Baugruppenzugehörigkeit, etc. Die so definierten Standardprozesse dienen dann als Leitfaden für Neu- und

---

<sup>1</sup> Unter einer Produktkomponente werden sowohl einzelne Bauteile als auch Baugruppen, Aggregate oder Systeme zusammengefasst, aus denen sich ein Produkt zusammensetzt.

Anpassungskonstruktionen sowie für Änderungsprozesse. Ein wesentlicher Nachteil dieser Lösung besteht im Generierungs- und Anpassungsaufwand für derartige Regelwerke. Außerdem ist es schwierig, die detaillierten Teilprozesse auf Bauteilebene zu einem Gesamtprozess für das Endprodukt zusammenzuführen. Des Weiteren verhindert die Definition solch rigider Prozesse die Suche nach neuen innovativen Lösungen, da sie dem Konstrukteur ein bestimmtes Lösungsverfahren vorschreiben.

Trotz der genannten Schwierigkeiten nimmt der Zwang einer plan- und kontrollierbaren Produktentwicklung deutlich zu. Immer komplexere Produkte erzeugen eine Menge an Produktinformationen, die ohne eine gezielte Ablaufsteuerung kaum noch beherrscht werden kann. Outsourcing und die Konzentration auf Kernkompetenzen führen dazu, dass Unternehmen verstärkt in Entwicklungspartnerschaften (sog. „Engineering Networks“) kooperieren. Dies erfordert eine zielgerichtete und bedarfsgerechte Kommunikation und Abstimmung der Entwicklungsschritte der Partner untereinander. Die daraus resultierenden Abhängigkeiten innerhalb des Produkts und innerhalb des Entwicklungsprozesses sind für den einzelnen Konstrukteur nicht mehr überschaubar.

## **2 IT-Unterstützung im Entwicklungsprozess**

### **2.1 CAD-Systeme und Wissensmanagement**

Die ersten Computersysteme für die Konstruktion waren einfache 2D-CAD-Systeme, deren Aufgabe hauptsächlich darin bestand, das Zeichenbrett zu ersetzen. Heutige 3D-CAD-Systeme übersteigen deren Leistungsfähigkeit natürlich bei weitem. Trotzdem stellen sie immer noch sehr spezialisierte Insellösungen dar, die nur bedingt zur Prozesssteuerung in Engineering Networks geeignet sind. Funktionen zur Erleichterung der Zusammenarbeit beschränken sich in den meisten Fällen auf web-basierte Lösungen, die einen Zugriff auf Daten und die gemeinsame Bearbeitung dieser von unterschiedlichen Standorten aus ermöglichen. Das Wissen, welches sich mittlerweile durch entsprechende Knowledge-Werkzeuge in CAD-Modellen ablegen lässt, ist von Außen nicht zugänglich, und damit für ein integriertes Prozessmanagement nicht verfügbar.

Standardisierte Schnittstellen oder herstellereigenspezifische Anpassungen erlauben es zwar, CAD-Daten in nachgelagerten CAX-Systemen (wie z.B. FEM) zu nutzen. Eine Kopplung zu PLM-Systemen ist aber in den meisten Fällen nur auf den Austausch verwaltungsrelevanter Daten (Ersteller, Zeichnungsformat, etc.) und einen Abgleich der Produktstruktur ausgelegt. Dieses führt dazu, dass bei Änderungen, die im PLM-System ablauforganisatorisch geplant werden, gerade geometrische und topologische Abhängigkeiten innerhalb eines Produktmodells übersehen werden. Daraus resultieren zeit- und kostenintensive Iterationen, die sich vermeiden ließen, wenn bereits in der Planungsphase des Änderungsvorhabens ein Zugriff auf diese Informationen möglich wäre.

In Bezug auf das Anforderungsmanagement wäre eine weiterreichende Integration ebenfalls wünschenswert. Viele Anforderungen sind geometrischer Natur, die einerseits über Knowledge-Elemente in das CAD-System eingebracht werden können, und deren Einhaltung andererseits über eine Rückkopplung aus dem CAD-System überwacht werden kann. Dazu sind natürlich auch im PLM-System entsprechende Strukturen zu schaffen, die diese Informationen verwalten können.

### **2.2 PLM-Systeme**

Mit zunehmender Nutzung der Computer im Konstruktionsumfeld ergab sich die Notwendigkeit, die anfallenden Datenmengen mit entsprechenden Werkzeugen zu verwalten. Aus einfachen Zeichnungsverwaltungssystemen entstanden so in den letzten Jahren leistungsfähige Produktdaten-Management-Systeme, die zusätzlich zur Dokumentenverwaltung auch Funktionen zum Produktstrukturmanagement, zur Klassifikation und zum Projekt- und Workflowmanagement anbieten.<sup>2</sup>

Mittlerweile verschiebt sich der Fokus vom reinen Datenverwaltungswerkzeug hin zu einem umfassenden System zum Management aller mit dem Produktleben verbundener Daten – zu so genannten PLM-Systemen (Product Lifecycle Management). Die Erweiterung bezieht sich auf die horizontale Integration durch Einbeziehung weiterer Module zur Unterstützung des

<sup>2</sup> PLM-Systeme sind auch Gegenstand des Artikels „PDM/PLM – Verwalten von Produktdaten ohne Grenzen !?“ auf Seite 59

Produktlebenszyklus, wie z.B. Anforderungs- oder Instandhaltungsmanagement, sowie die vertikale Integration zur Unterstützung der Kollaboration vernetzter Unternehmen. Damit entwickeln sich PLM-Systeme immer mehr zum Rückgrat der DV-Landschaft in den entwicklungsbezogenen Bereichen eines Unternehmens.

Allerdings fehlen auch aktuellen PLM-Systemen noch Funktionen zur effizienten Ablaufsteuerung in der unternehmensübergreifenden Produktentwicklung. Dazu zählt beispielsweise auch die Festlegung von Kommunikationsregeln (*Wer ist wann über was in welcher Form zu informieren?*), die mit den verfügbaren Workflow-Funktionen nicht zufrieden stellend definiert werden können. Dieses Defizit wird im nächsten Abschnitt näher untersucht.

## 2.3 Workflowmanagement in der Produktentwicklung

### 2.3.1 ‚Klassischer‘ Workflow

Unter einem Workflow versteht man die (teilweise) Automatisierung eines Geschäftsprozesses zur Übergabe von Dokumenten und Informationen nach vorgegebenen Regeln von einem Teilnehmer zum anderen, um eine bestimmten Aufgabe zu erfüllen (nach /1/). Ihren Ursprung haben Workflow-Management-Systeme (WfMS) in der „Office-Automatisierung“, bei der Dokumente in einer elektronischen Umlaufmappe von einem Bearbeiter zum nächsten geschickt werden.

Für das Management komplexer Entwicklungsprozesse ist diese Art der dokumentenbasierten Workflows aus mehreren Gründen ungeeignet. Zum einen bietet die starre Zuordnung von Personen und Rollen zu Aufgaben nicht die nötige Flexibilität, die bei Konstruktionsprozessen erforderlich ist. Zum anderen lassen sich Workflows nur in Abhängigkeit vom zu bearbeitenden Objekttyp definieren, der Informationsgehalt eines bestimmten Objekts hat keinen Einfluss auf die Rollenzuordnung oder die Art und Abfolge der Aktivitäten. Gerade in der Konstruktion ist die Zuständigkeit einzelner Personen aber stark objektabhängig. Während in einem Fall z. B. ein Bearbeiter für das Erstellen einer 2D-Zeichnung einer Baugruppe A zuständig ist, kann in Bezug auf die Baugruppe B ein ganz anderer Bearbeiter für die Erstellung des gleichen Zeichnungstyps verantwortlich sein. D. h. die Verantwortlichkeit definiert sich in der Konstruktion

vielfach auf Basis der betrachteten Entwicklungsobjekte.

### 2.3.2 Parameterbasierter Engineering Workflow

Im Rahmen des EU-Projekts SIMNET<sup>3</sup> wurde daher ein System für einen parameterbasierten Workflow entwickelt. Im Mittelpunkt stehen dabei Konstruktionsparameter, die konstruktive Eigenschaften einer Produktkomponente definieren. Die Abfolge der Entwicklungsschritte ergibt sich aus der Vernetzung der Parameter untereinander. Personen werden innerhalb einer bestimmten Benutzerkategorie einem Parameter zugeordnet, die die Rolle der Person hinsichtlich des betrachteten Parameters definiert. Die Kommunikation zwischen Projektpartnern erfolgt durch einen Freigabeworkflow, der durch vorgegebene Statusübergänge ausgelöst wird. Obwohl die Vorteile dieser Lösung im Rahmen des Forschungsvorhabens nachgewiesen werden konnten, ist eine Erweiterung des Konzepts auf zusätzliche Produktdatenelemente notwendig, um die Abstimmung zwischen Entwicklungspartnern über den gesamten Produktlebenszyklus unterstützen zu können. Zudem ist bislang keine eindeutige Trennung von Anforderungen und Parametern möglich, was die Nachverfolgung im Rahmen des Änderungsmanagements erschwert.

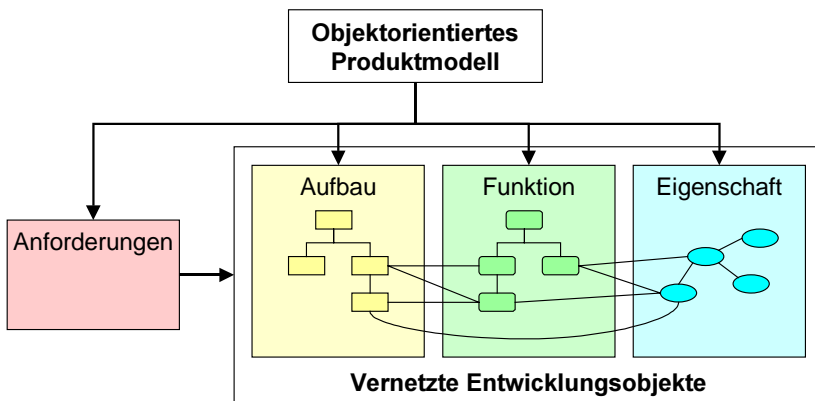
Im folgenden wird daher ein Konzept für einen erweiterten Engineering Workflow vorgestellt, welches es Entwicklungspartnern ermöglicht, auf der Basis unterschiedlicher Produktinformationen gezielt miteinander zu kommunizieren, um Konstruktionsentscheidungen und Entwicklungsaktivitäten untereinander abzustimmen.

## 3 Konzept eines 3-stufigen objektorientierten Produktmodells

### 3.1 Definition „Entwicklungsobjekt“

Der Begriff „Entwicklungsobjekt“ wird von Kruse wie folgt definiert: *„Imaginäres oder reales Objekt eines technischen Systems in beliebiger Konkretisierung, das als Aggregation oder als Einzelobjekt durch seine Eigenschaften und Relationen zu anderen Entwicklungsobjekten beschrieben ist.“ /2/*

<sup>3</sup> SIMNET – Workflow Management for Simultaneous Engineering Networks, gefördert mit Mitteln der Europäischen Kommission (EP-26780), <http://www.imw.tu-clausthal.de/simnet>



**Bild 1:** Objektorientiertes Produktmodell

Gerade in den frühen Phasen der Produktentwicklung greift diese Definition aber zu kurz. Oftmals liegen am Beginn einer Entwicklung nur sehr abstrakte Konzepte für das zu entwickelnde Produkt vor. Bei der Lösungsfindung stehen daher eher zu erfüllende Funktionen oder geforderte Eigenschaften im Mittelpunkt. Aus diesem Grund bietet es sich an, den Begriff des Entwicklungsobjekts auf Funktionen und Eigenschaften auszudehnen, da diese ebenfalls als Auslöser für Diskussionen zwischen Entwicklungspartnern sind. Zudem sind Funktionen und Eigenschaften die Bindeglieder zwischen den einzelnen Produktkomponenten (siehe Bild 1). Verallgemeinert lässt sich damit sagen:

*Ein Entwicklungsobjekt ist Gegenstand einer konstruktiven Tätigkeit. Dabei kann es sich um ein reales oder imaginäres Objekt eines technischen Systems, um eine von diesem System zu erfüllende Funktion oder um eine das System oder eine Funktion beschreibende Eigenschaft handeln. Die*

*Gesamtheit der Entwicklungsobjekte und ihre Relationen untereinander beschreiben den aktuellen Entwicklungsstand eines Produkts.*

### 3.2 Vernetzung mithilfe modellbasierter Kontextbeschreibungen

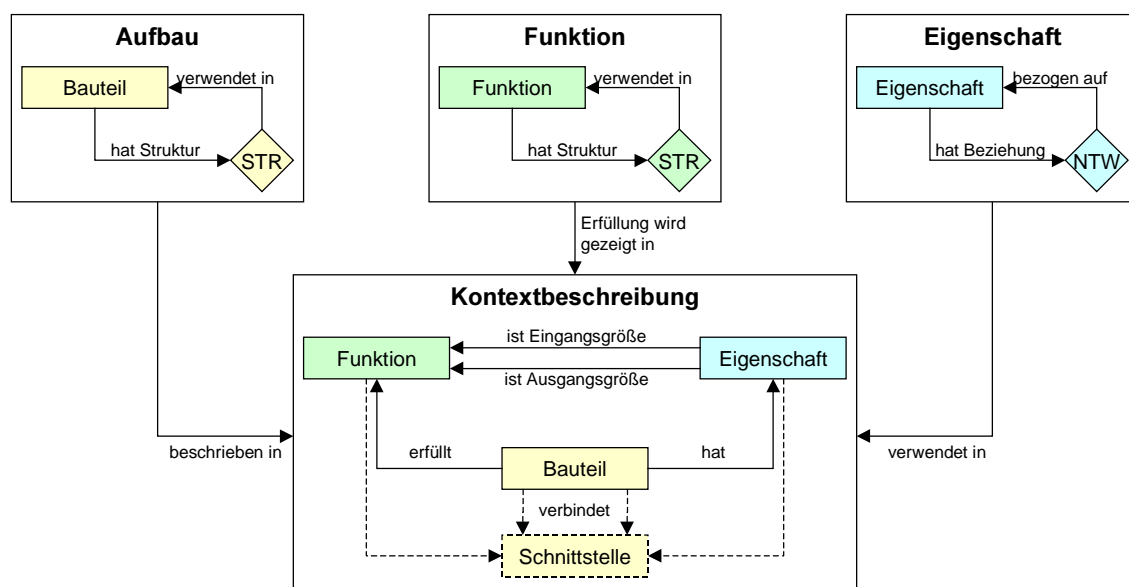
Die Zusammenhänge zwischen verschiedenen Entwicklungsobjekten werden mithilfe einer modellbasierten

Kontextbeschreibung dargestellt (Bild 2), die die Beziehungen zwischen Produktkomponenten, Funktionen und Eigenschaften unter einem bestimmten Gesichtspunkt verdeutlicht. Dieser Ansatz lässt sich mit den Anwendungsfällen (Use Cases) der Unified Modelling Language (UML) vergleichen. Ein Anwendungsfall veranschaulicht eine typische Interaktion zwischen einem Anwender und einem Computersystem [3]. Wesentliche Merkmale eines Anwendungsfalls sind:

- Erfassen einer für den Benutzer sichtbaren Funktion,
- Erreichen eines für den Benutzer abgrenzbaren Ziels.

Darauf basierend lassen sich für die Kontextbeschreibungen die folgenden bestimmenden Merkmale ableiten:

- Erfassen einer für das Produkt wesentlichen Charakteristik (notwendige Komponente, zu erfüllende Funktion oder notwendige



**Bild 2:** Entwicklungsobjekte in der Kontextbeschreibung

Eigenschaft),

- Erfassen der Informationen, die zur Erfüllung einer Anforderung an das Produkt notwendig sind (Kundenforderung, Forderungen zur Abstimmung mit Lieferanten).

Im weitesten Sinne geht es bei der Kontextbeschreibung um die ‚Interaktion‘ der verschiedenen Entwicklungsobjekte im Rahmen von Szenarien. Diese sollen Entwicklungsobjekte passend zur augenblicklichen Aufgabenstellung gruppieren. Dabei kann einerseits die Erfüllung einer bestimmten Funktion durch die jeweiligen Funktionsträger mit den dafür relevanten Eigenschaften im Mittelpunkt stehen. Andererseits kann ein Szenario auch eine detaillierte Beschreibung einer Produktkomponente mit ihren Eigenschaften und Funktionen sowie benachbarten Komponenten darstellen. Dieser Fokus ist vom Anwender frei wählbar.

### 3.3 Das 3-stufige Produktmodell

Der Einsatz der modellbasierten Kontextbeschreibung in der Produktentwicklung erfolgt in drei aufeinander aufbauenden Stufen, die die zunehmende Konkretisierung der Entwicklungsobjekte widerspiegeln (Bild 3):

- *Definitionsebene* – auf dieser Ebene werden allgemeingültige Zusammenhänge für die Produktpalette eines Unternehmens

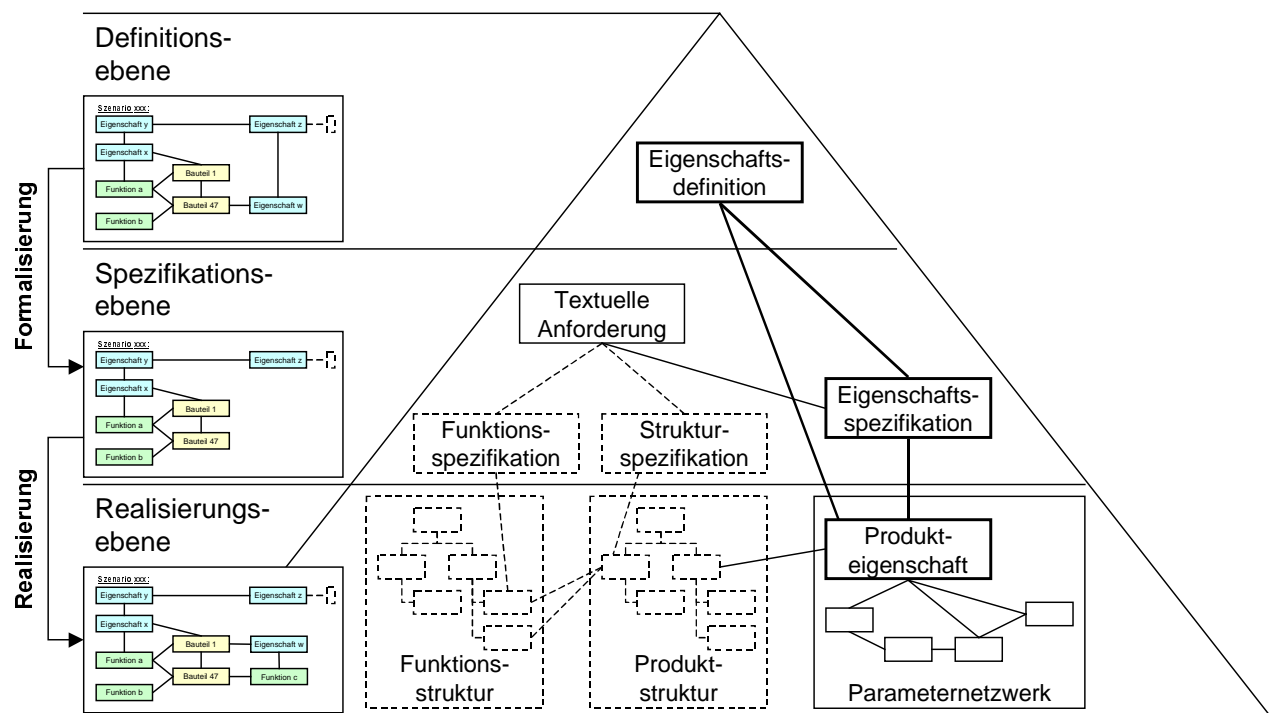
beschrieben

- *Spezifikationsebene* – ausgehend von den Anforderungen wird mithilfe der definierten Szenarien die Spezifikation des Produkts erarbeitet und mit dem Kunden abgestimmt
- *Realisierungsebene* – auf dieser Stufe erfolgt die Verwaltung konkreter Produkte; sie dient außerdem dem Management der Produktentwicklung und der Kommunikation zwischen den Entwicklungspartnern

Zusammen mit der Anforderungsebene, auf der Kundenanforderungen als eigenständige Objekte verwaltet werden können, ergibt sich bei der Anwendung des 3-Stufen-Modells eine lückenlose Dokumentation des Entwicklungsprozesses und der dabei getroffenen Entscheidungen. Zudem lässt sich durch die Aufteilung der unterschiedlichen Ebenen jederzeit nachvollziehen, welche Anforderung des Kunden in welche Spezifikation übergegangen ist, und wie diese dann in eine konstruktive Lösung umgesetzt wurde. Durch Rückkopplungen lässt sich dabei auch nachvollziehen, welchen Einfluß die Erarbeitung unterschiedlicher Lösungskonzepte auf die Produktspezifikation hat.

#### 3.3.1 Die Definitionsebene

Auf der Definitionsebene werden allgemeingültige Zusammenhänge innerhalb des Produktspektrums eines Unternehmens beschrieben. Dieses dient der



**Bild 3:** 3-stufiges Produktmodell

Klassifizierung von Entwicklungsobjekten, um damit die Grundlage für das Wissensmanagement über vorhandene (Teil-)Lösungen bereits bearbeiteter Problemstellungen zu schaffen.

Die Kontextbeschreibung hält fest, welche generellen Angaben bei der Bearbeitung eines Problems notwendig sind (Komponenten, Haupteigenschaften, Hauptfunktionen). Diese Angaben dienen in den nachgelagerten Phasen der Kontrolle auf Vollständigkeit, sowie als Leitfaden, welche entwicklungstechnischen Aspekte bei der Ausarbeitung zu berücksichtigen sind. Des Weiteren ergibt sich aus der Zuordnung von Spezifikationen bzw. Realisierungen zu Definitionselementen ein Wissenspool, welche Produkte oder Lösungen bereits entwickelt wurden.

### 3.3.2 Die Spezifikationsebene

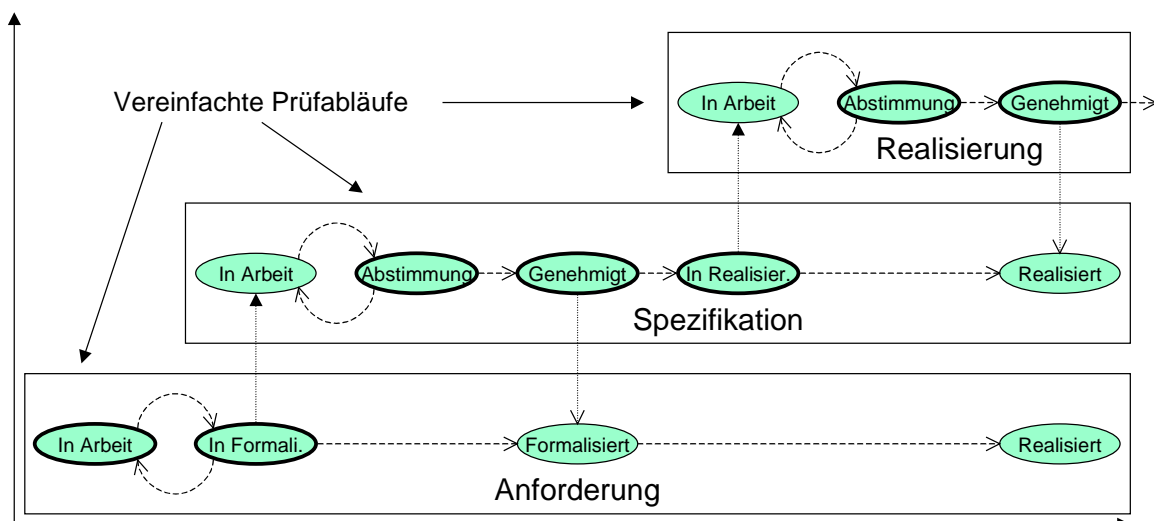
Die projektbezogene Arbeit an Entwicklungsobjekten beginnt mit der Erstellung einer modellbasierten Spezifikation des zu entwickelnden Produkts. Dazu werden Anforderungen, die vom Kunden meistens in textueller Form oder als Listen präsentiert werden, formalisiert. Mit der Formalisierung werden zwei Ziele verfolgt. Zum einen werden natürlichsprachliche Anforderungen, die oft widersprüchlich und mehrdeutig sein können, in eine möglichst eindeutige Beschreibung überführt. Zum anderen beinhalten Kundenanforderungen häufig implizite Informationen (Annahmen oder Voraussetzungen, die nicht offensichtlich formuliert sind), die durch eine Formalisierung explizit aufgezeigt werden sollen (siehe hierzu auch /4/). Während der Formalisierung werden die Kundenanforderungen in funktionale,

komponentendefinierende und eigenschaftsbeschreibende Entwicklungsobjekte unterteilt. Zusammenhänge zwischen den Objekten werden über Kontextbeschreibungen abgebildet. Hilfreich sind dazu die auf der Definitionsebene modellierten Kontextbeschreibungen, da sie Vorgaben über erforderliche Informationen enthalten. Dadurch lassen sich fehlende Anforderungen aufdecken und in einer workflowunterstützten Diskussion mit dem Kunden klären.

Die modellbasierte Spezifikation auf Basis von Entwicklungsobjekten führt zudem dazu, dass Widersprüche in der Anforderungsliste durch die Referenzierung gleicher Objekte aufgedeckt werden können. Jedes definierte Objekt steht dem gesamten Entwicklungsteam zur Verfügung. Dadurch wird bspw. sichergestellt, dass eine einmal spezifizierte Eigenschaft nicht mit unterschiedlichen Werten belegt werden kann. Die notwendige Kontrolle ergibt sich durch die Klassifizierung über die Definitionsebene.

### 3.3.3 Die Realisierungsebene

Während die Spezifikationsebene das Entwicklungsziel festhält, werden auf der Realisierungsebene alle entwicklungsrelevanten Daten verwaltet, d. h. auf dieser Ebene werden die tatsächlich realisierte Produktstruktur, die vom Produkt erfüllten Funktionen und die aktuelle Ausprägung der Eigenschaften festgehalten. Ausgangspunkt dazu sind die Kontextbeschreibungen und Entwicklungsobjekte der Spezifikation, die im Zuge der Entwicklung instanziiert und konkretisiert werden. Bei Bedarf



**Bild 4:** Abgestimmte Statusnetzwerke zur Koordination der Kommunikation



können dem Produktmodell auch weitere Objekte hinzugefügt werden. Das Ergebnis ist eine virtuelle Beschreibung des Produkts.

Die Trennung der Spezifikations- und Realisierungsebene ermöglicht in Bezug auf die Anforderungsverfolgung jederzeit einen Soll/Ist-Vergleich. Außerdem lassen sich in der Phase der Lösungsfindung unterschiedliche Lösungen hinsichtlich des Erfüllungsgrades von Anforderungen miteinander vergleichen.

#### 4 Erweiterter Engineering Workflow

Die Aktivitäten innerhalb des 3-stufigen Produktmodells werden über einen Engineering Workflow gesteuert, der auf der einen Seite die Anforderungsanalyse unterstützt, und auf der anderen Seite die Entwicklungsaktivitäten auf Basis der vernetzten Entwicklungsobjekte kontrolliert. Dadurch lässt sich die gesamte Produktentwicklung ausgehend von der Anforderungsentwicklung über die Erstellung der Spezifikation bis zur Ausarbeitung des Produkts steuern.

Die Koordination zwischen den einzelnen Phasen basiert auf aufeinander abgestimmten Prüfabläufen für die Entwicklungsobjekte in den unterschiedlichen Lebensphasen des Produkts

(siehe Bild 4). Durch die Unterteilung des Produktmodells in drei Ebenen ist es außerdem möglich, Verantwortlichkeiten gezielt für bestimmte Phasen des Produktlebenszyklus zu definieren.

#### 4.1 EWF in der Anforderungsentwicklung

Der Konstruktionsprozess nach Pahl/Beitz oder VDI 2221 stellt zwar die Klärung der Aufgabenstellung mit der Anforderungsliste als Ergebnis an den Anfang der Produktentwicklung. Gleichzeitig wird jedoch darauf hingewiesen, dass diese Liste stets auf dem neuesten Stand zu halten ist, also Änderungen auch während der Entwicklung auftreten können. Zudem ist zu berücksichtigen, dass die Anforderungsentwicklung selbst ein iterativer Prozess ist. Suzanne und James Robertson stellen in /5/ den so genannten Volere Requirements Process zur Anforderungsentwicklung vor (siehe Bild 5). Dieser sehr generisch gehaltene Prozess eignet sich sowohl für die Softwareentwicklung als auch für die Konstruktion. Basierend auf ‚Snow-Cards‘ wird der Kundenwunsch, die Quelle, der Grund, die Prüfkriterien usw. schriftlich festgehalten. Bevor eine Anforderung in die Anforderungssammlung eingeht, muss sie einen ‚Quality Gateway‘ passieren. Dabei wird geprüft, ob die Anforderung formalen Kriterien genügt, wie z. B. Vollständigkeit, Widerspruchsfreiheit, Eindeutigkeit, etc.

In Bezug auf den Engineering Workflow werden im PLM-System eigenständige Anforderungsobjekte definiert, die die DV-technische Umsetzung der ‚Snow-Card‘ darstellen. Jeder Anforderung wird jeweils ein verantwortlicher Mitarbeiter des Lieferanten und des Kunden zugeordnet, die dann bei Änderungen oder Rückfragen als Ansprechpartner zur Verfügung stehen. Des Weiteren muss eine Person festgelegt werden, die die Rolle des ‚Quality Gateways‘ übernimmt. Da diese Zuordnung für eine Vielzahl der Anforderungen gleich ist, genügt für die Ablaufsteuerung ein klassischer Workflow, der für einzelne oder Gruppen von Anforderungen gestartet wird. Am Ende der Anforderungsentwicklung liegt eine strukturierte Anforderungssammlung im System vor, die als Ausgangspunkt für

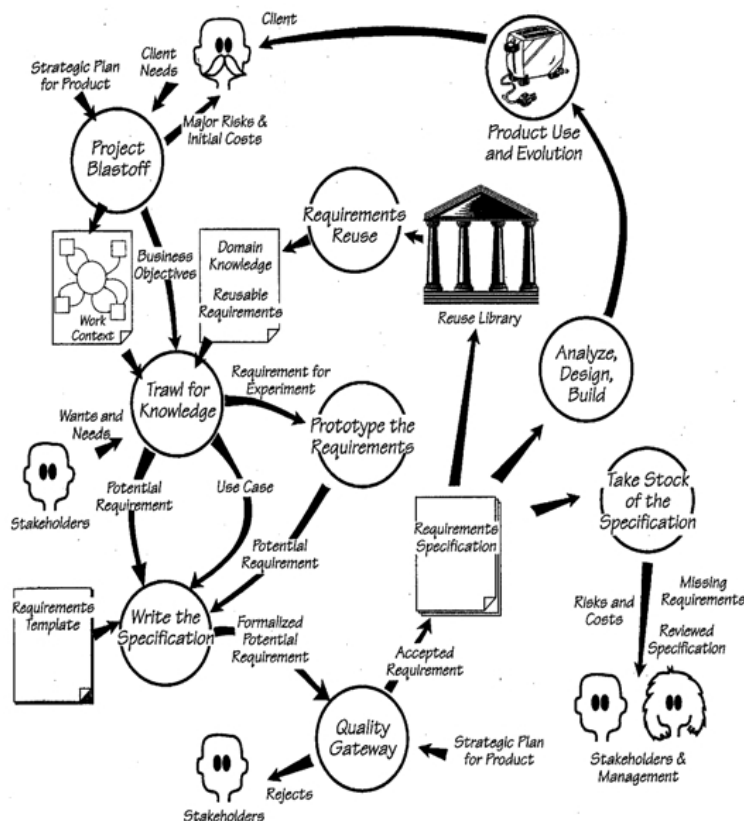


Bild 5: Volere Prozess (aus /5/)

den nachfolgenden Formalisierungsprozess dient.

#### 4.2 Abstimmung der Spezifikation

Mithilfe der Formalisierung werden die natürlich-sprachlichen Anforderungen in eine objektorientierte Spezifikationen überführt. Damit werden zwei Ziele verfolgt – die Klärung von Widersprüchen oder zusätzlichen Anforderungen und die formelle Anerkennung der Spezifikation als Vertragsgrundlage für die folgende Entwicklung.

Durch das objektorientierte Spezifikationsmodell auf Basis der Kontextbeschreibungen der Definitionsebene lassen sich Widersprüche und fehlende Angaben leicht aufdecken. Durch eine Rückkopplung zum Anforderungswork-flow lassen sich diese mit den Ansprechpartnern des Kunden klären.

Auf der anderen Seite bilden die Entwicklungsobjekte und Kontextbeschreibungen der Spezifikationsebene die Kommunikationsplattform zwischen Kunden und Lieferanten sowie zwischen Lieferant und Unterauftragnehmer. Dazu werden spezifizierte Entwicklungsobjekte in einem Abstimmungs- und Freigabeworkflow an alle betroffenen Personen geschickt, die dem aktuellen Stand zustimmen oder widersprechen können. Die betroffenen Personen ergeben sich aus ihrer Zuordnung zu einem Entwicklungsobjekt innerhalb einer definierten Benutzerkategorie. Dadurch wird einerseits sichergestellt, dass der Auftragnehmer die Kundenwünsche richtig verstanden hat, andererseits wird die Spezifikation nach erfolgter Genehmigung durch alle Vertragspartner eingefroren und lässt sich nur durch ein entsprechendes Änderungsweisen an neue Anforderungen anpassen.

#### 4.3 Steuerung der Produktentwicklung

Mithilfe der Entwicklungsobjekte auf der Realisierungsebene lassen sich die Entwicklungsaktivitäten und die dazu notwendige Kommunikation zwischen den Entwicklungspartnern gezielt steuern. Dabei kann es sich sowohl um verschiedene Abteilungen innerhalb eines Unternehmens handeln, als auch um externe Engineering Partner. Die durch Kontextbeschreibungen vernetzten Entwicklungsobjekte definieren dabei den Gesamtprozess. Die Ausrichtung des Netzes erfolgt

durch eine schrittweise Bearbeitung der Entwicklungsobjekte in Abhängigkeit von den vorhandenen Beziehungselementen. Der Stand der Entwicklung wird dabei durch den Härtegrad des Objekts widerspiegelt (1 – erste Annahme getroffen, 5 – Objekt festgelegt und auskonstruiert, weitere Änderungen sind nur durch einen formelles Änderungsablauf möglich).

Ausgangspunkt der Entwicklung sind vordefinierte Objekte (Härtegrad 5), wie z. B. Bauteile und Baugruppen, die ohne Änderung wieder verwendet werden oder Eigenschaften, die durch Anforderungen vordefiniert sind. Aus diesen lassen sich erste Konzepte für weitere Objekte ableiten, die von den vordefinierten Elementen abhängig sind. Ist dieses nicht möglich, muss einer der verantwortlichen Bearbeiter eine erste Annahme zu einem Objekt treffen, so dass diese als Eingangsinformation für andere Entwicklungsobjekte dienen kann. Die zunehmende Konkretisierung der Konstruktionsergebnisse spiegelt sich in der Erhöhung des Härtegrads wider, und muss durch die zugeordneten Personen genehmigt werden. Dies geschieht über einen Genehmigungs- und Freigabeworkflow auf Basis des betroffenen Entwicklungsobjekts.

### 5 Wissensmanagement mithilfe strukturierter Entwicklungsobjekte

Wie bereits in den vorangegangenen Abschnitten erwähnt, ist eine Grundlage für das Wissensmanagement die Klassifikation der Entwicklungsobjekte über die Definitionsebene. Die Kontextbeschreibung ermöglicht zudem eine Einordnung des Wissens in Bezug auf die Randbedingungen und getroffenen Annahmen.

Eine weitere Möglichkeit ergibt sich aus einer erweiterten Integration zwischen PLM- und CAD-Systemen, die vor allem die Abstimmung geometrischer Eigenschaften und ihrer Beziehungen untereinander betrifft. Dazu werden bereits auf der Definitionsebene Entwicklungsobjekte mit den Wissensselementen des dazugehörigen CAD-Modells verknüpft. In der Realisierungsphase können dann die mit Werten belegten Eigenschaften über eine erweiterte Schnittstelle an das CAD-Modell übergeben werden. Eine bidirektionale Ankopplung ermöglicht außerdem die Aktualisierung der Werte im PLM-System, wenn diese im CAD-Modell geändert wurden. Diese Informationen können dann



wiederum zur Steuerung des Entwicklungsprozesses herangezogen werden. Außerdem lässt sich so die Konsistenz der Informationen auch über Systemgrenzen hinweg sicherstellen.

## **6 Literatur**

- /1/ Workflow Management Coalition: Terminology & Glossary: Winchester: 1999
- /2/ Kruse, P. J.: Anforderungen in der Systementwicklung : Erfassung, Aufbereitung und Bereitstellung von Anforderungen in interdisziplinären Entwicklungsprojekten: Fortschritt-Berichte ; 191. Als Ms. gedr. Auflage. Düsseldorf: VDI-Verl., 1996
- /3/ Fowler, M. ; Scott, K.: UML - konzentriert : die Standardobjektmodellierungssprache anwenden: 1. Aufl., 1., korrigierter Nachdr. Auflage. Bonn [u.a.]: Addison-Wesley, 1998
- /4/ Heimannsfeld, K.: Modellbasierte Anforderungen in der Produkt- und Systementwicklung : von Dokumenten zu Modellen: Berichte aus dem Maschinenbau. Aachen: Shaker, 2001
- /5/ Robertson, S. ; Robertson, J.: Mastering the requirements process: Harlow [u.a.]: Addison-Wesley, 1999

# Ein Anwendungsbeispiel zum Einsatz der Rapid Tooling Prozessketten „Die Fertigung von einem Oldtimer-Ersatzteil“

Turan, H. C.

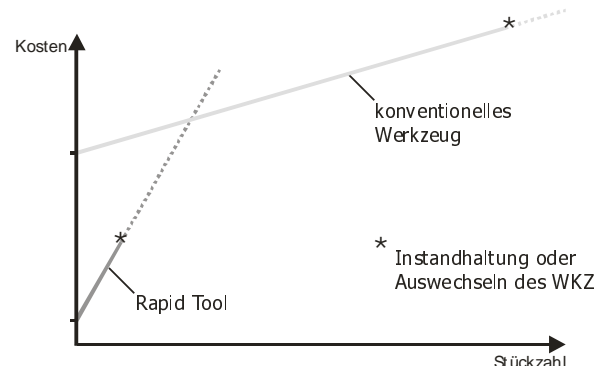
*Der Einsatz verschiedener Rapid Tooling Verfahren zur Herstellung der Klein- und Vorserien neuer Produkte ist bekannt. Dies ermöglicht die wirtschaftliche Herstellung kleiner Stückzahlen, deren Fertigung sonst sehr teuer wäre. Somit ist das „Rapid Tooling“ das ideale Werkzeug für die Herstellung der Oldtimer-Ersatzteile. In diesem Artikel wird es versucht, am Beispiel eines Kunststoffspritzteiles einen Überblick über diese Prozesskette zu schaffen.*

*The usage of different Rapid Prototyping processes to produce small and pre-production series is known. This enables the economical production of small quantities, whose production would otherwise be very expensive. This property makes the Rapid Tooling an ideal tool for making spare parts for classical automobiles. This article gives an overview of the process chain that leads to a plastic injection part.*

## 1 Einleitung

Die Rapid Tooling Verfahren werden häufig da eingesetzt, wo sonst der konventionelle Werkzeugbau sich als ungünstig erweisen. Oft sind die Kosten der herkömmlichen Werkzeuge wegen der erforderlichen, meist komplizierten Fräsbahnerstellung und der langen Bearbeitungszeiten sehr hoch. Reichen die spanenden Bearbeitungstechniken nicht aus, Senkerodieren und Drahterodieren müssen eingesetzt werden. Diese Zusammenarbeit verschiedener Fertigungssysteme können unterschiedliche Probleme mit sich bringen. Daher ist ein Einsatz von konventionellen Werkzeugen erst mit hohen Stückzahlen sinnvoll (**Bild 1**).

Bei Rapid Tooling ist das nicht der Fall. Die kleine Stückzahlen können im Vergleich zu den konventionellen Verfahren günstig hergestellt werden. Dabei wird höhere Einzelkosten der zu produzierenden Teile wegen der aus der schlechten Wärmeleiteigenschaften resultierenden höheren Zykluszeit im Kauf genommen.



**Bild 1:** Die Kosten über Stückzahl

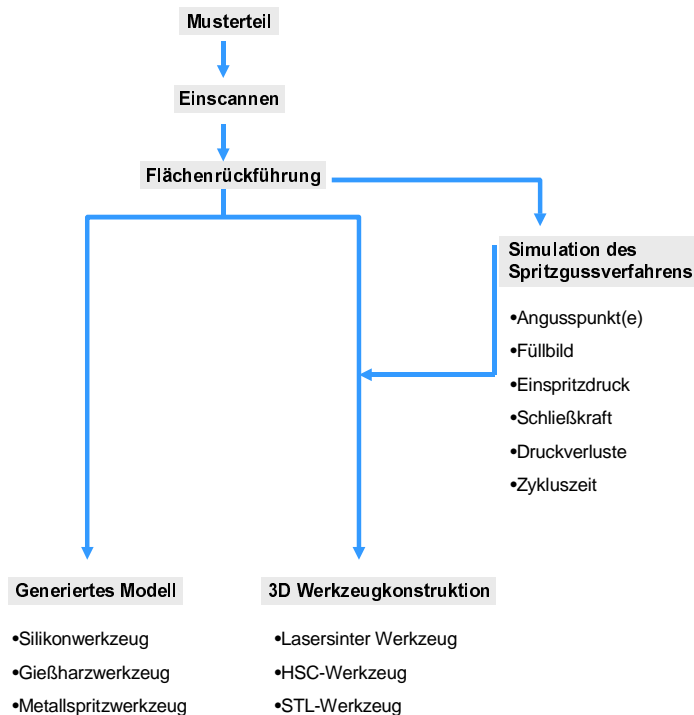
In diesem Artikel werden die einzelnen Schritte am Beispiel eines Türgriffblendes (**Bild 2**) von einem BMW 2002 erläutert. Da dieses Fahrzeug wie die anderen die sogenannten Youngtimers immer noch einen gewissen Nutzwert hat, werden jährlich 200 links und rechts Sätze gebraucht. Um die Lagerkosten auf ein Minimum halten zu können, darf die gesamte Stückzahl diese Zahl nicht deutlich überschreiten.



**Bild 2:** die Türgriffblende

## 2 Die Umsetzung

Der Auftrag war 200 Sätze zu fertigen, die sich dann zum Verchromen eigneten. Die Vorgehensweise zu den verschiedenen RT Eissätsen ist im fol-

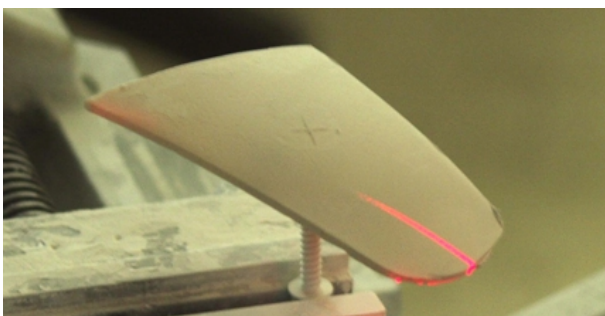


**Bild 4:** Die Vorgehensweise zu den verschiedenen Rapid Tooling Eissätsen

genden Diagramm abgebildet:

### 2.1 Digitalisieren und Flächenrückführung

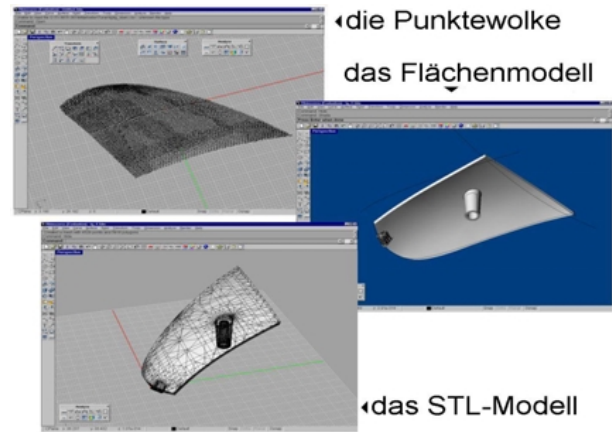
Da das Teil nicht als 3D CAD-Datei vorhanden war, musste es zuerst eingescannt werden.



**Bild 3:** Das eingespannte Teil I beim Einscannen

Für diesen Zweck wurde ein Laserscanner mit einem 7-Achsen-Koordinaten-Messarm benutzt.

Die mit dem Scannen erzeugte zweiteilige Punktwolke im ASCII Format, wurde in die Rhinoceros Flächenmodellierungssoftware importiert und da bearbeitet. Das fertige Modell wird anschließend ins STL-Format umgewandelt(**Bild 5**).

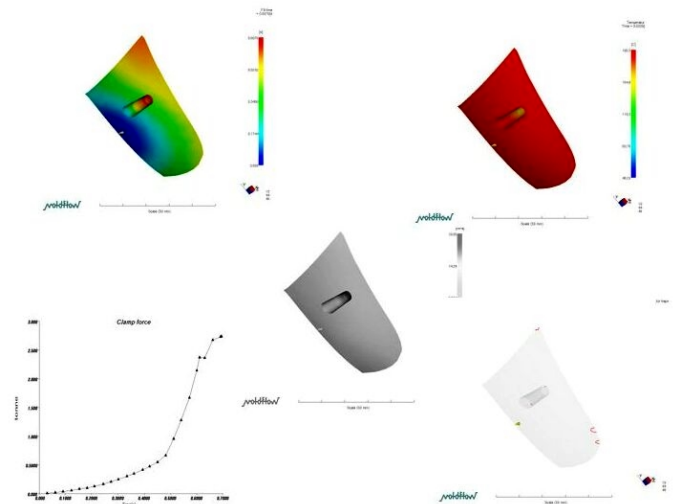


**Bild 5:** Bearbeitung der Punktwolke zum Flächenmodell und das resultierende STL-Modell

### 2.2 Simulation des Spritzgussverfahrens

Für die Simulation mit der Moldflow Plastics Insight Software (MPI) war ein Mittelflächenmodell erforderlich. Dieses Modell wurde wiederum mit der Rhinoceros Software erstellt.

Das importierte Mittelflächenmodell wurde zuerst analysiert, um den richtigen Angusspunkt zu ermitteln. Danach wurde eine Serie von Berechnungen durchgeführt, deren Ergebnisse graphisch in dem **Bild 6** dargestellt sind.



**Bild 6:** Ergebnisse der Berechnungen mit MoldFlow

Laut dieser Ergebnisse ist es möglich, dieses Teil mit einem Einspritzdruck von ca. 20 MPa und einer Schliesskraft von ca. 6 Tonnen zu fertigen. Die Zykluszeit hängt von dem Material des Werkzeugeinsatzes ab und variiert schätzungsweise von 20 bis 80 Sekunden je nach Werkzeug.

Die Bindenähte befinden sich im nicht sichtbaren Bereich und Stellen keine Gefahr dar. Das gleiche

gilt für die Lufteinschlüsse. Die an der Trennebene liegenden Lufteinschlüsse sind zu entlüften.

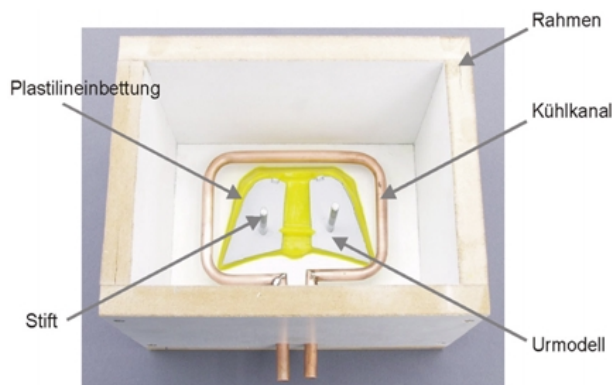
### 2.3 Auswahl des geeigneten Rapid Tooling Verfahrens und die Fertigung der Einsätze

Da das Teil später verchromt werden sollte, haben wir uns für ein aluminiumgefülltes Gießharzwerkzeug entschieden. Die sehr gute Polierbarkeit und die verbesserte Wärmeleiteigenschaften haben dabei eine große Rolle gespielt. Die mechanischen und thermischen Daten des verwendeten aluminiumgefüllten Gießharzes sind in der **Tab. 1** zu sehen:

|   |                            |
|---|----------------------------|
| Dichte                                  | : 1,95 kg/l                |
| E-Modul                                 | : 12.500 N/mm <sup>2</sup> |
| Biegefestigkeit                         | : 80 N/mm <sup>2</sup>     |
| Zugfestigkeit                           | : 50 N/mm <sup>2</sup>     |
| Zugdehnung                              | : 0,6 %                    |
| Schlagzähigkeit                         | : 5,5 kJ/m <sup>2</sup>    |
| Kugeldruckhärte                         | : 293 N/mm <sup>2</sup>    |
| Shore D Härte bei 20° C                 | : 91                       |
| Shore D Härte bei 160° C                | : 87                       |
| Glasübergangstemperatur                 | : 310 °C                   |
| Wärmeformbeständigkeit                  | : 220 °C                   |
| Druckfestigkeit bei 22° C               | : 150 N/mm <sup>2</sup>    |
| Druckfestigkeit bei 100° C              | : 120 N/mm <sup>2</sup>    |
| Linearewärmeausdehnung (23° bis 200° C) | : 74 1/K*E-6               |
| Wärmeleitzahl                           | : 2,20 W/Km                |
| Linearer Schwund                        | : 0,40 mm/m                |

**Tab. 1:** die mechanischen und thermischen Eigenschaften von dem verwendeten Gießharz

Der Ausgangspunkt für dieses Verfahren ist ein positives Urmodell. Das um 0,5 % vergrößerte Formteil wurde mit dem STL-Verfahren gebaut und anschließend manuell bearbeitet. Das nun treppeneffektfreie Urmodell wurde in eine Knetmasse eingebettet. Der Kühlkanal und die Stahlstifte wurden angebracht (**Bild 7**).



**Bild 7:** Vorbereitung der ersten Hälfte

Das Aluminiumpulver wird mit dem Gießharz zusammengemischt und entlüftet. Nach Zugabe des Härters wurde dieser Gieß in den Rahmen gegeben. Das Erstarren des Gießharzes dauert ca. 10 Stunden, danach wird die Knetmasse entnommen und die zweite Werkzeughälfte gegossen. Nach 10 Stunden ist das Werkzeug fertig zum Temperieren. Die Temperierung folgt nach den Herstellerangaben.

Die Aufbauschritte für den Aluminium gefüllten Einsatz sind in **Tab. 2** im einzelnen ausgeführt.

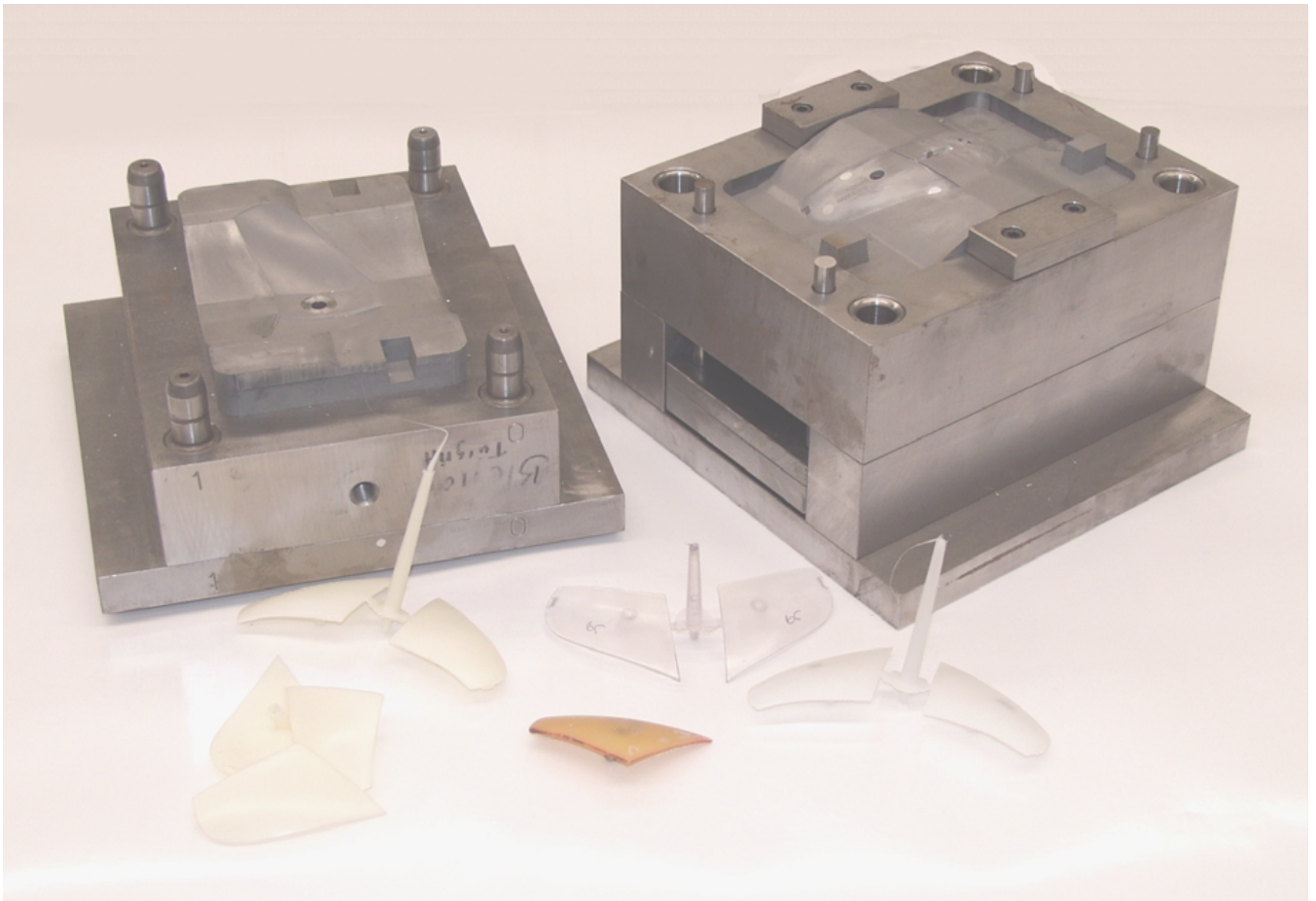
|   |           |
|---|-----------|
| Fertigung der STL-Urmodelle                         | 6 Std.    |
| Finishen der Urmodelle                              | 4 Std.    |
| Anbringen der Trennebene                            | 4 Std.    |
| Fixieren in einen Rahmen                            | 0,25 Std. |
| Umgießen mit Alu gefülltem Gießharz (1.Wkz.-Hälfte) | 1 Std.    |
| Erstarren des Gießharzes (1.Wkz.-Hälfte)            | 10 Std.   |
| Umgießen mit Alu gefülltem Gießharz (2.Wkz.-Hälfte) | 1,5 Std.  |
| Erstarren des Gießharzes (2.Wkz.-Hälfte)            | 10 Std.   |
| Temperieren des Werkzeuges                          | 20 Std.   |

|   |                   |
|---|-------------------|
| arbeitsintensive Zeit (Z <sub>a</sub> )   | 10,75 Std.        |
| maschinenintensive Zeit (Z <sub>m</sub> ) | 6 Std.            |
| passive Zeit                              | 40 Std.           |
| <b>Insgesamt</b>                          | <b>56,75 Std.</b> |

|                     |                  |
|---------------------|------------------|
| Stundenlohn         | 35               |
| Materialkosten      | 400              |
| STL-Modell          | 270              |
| <b>Gesamtkosten</b> | <b>1046,25 €</b> |

**Tab. 2:** die Kostenberechnung der aluminiumgefüllten Gießharzwerkzeugeinsätze

Die Werkzeughälften wurden danach in ein Stammwerkzeug eingesetzt und eingespritzt. Nach 200 Sätzen wies das Werkzeug kaum Gebrauchsspuren auf. Die Oberflächenqualität der Teile waren laut dem Hersteller nahezu identisch mit denen aus einem Aluminiumwerkzeug (**Bild 8**).



**Bild 8:** Das fertige Werkzeug und die Teile

### 3 Zusammenfassung

Wie diese Arbeit aufzeigt, ist dieses Rapid Tooling Verfahren im Verhältnis zu Serienwerkzeugen sehr schnell und günstig. Geringe Investitionskosten der aluminiumgefüllten Gießharzwerkzeugeinsätze, machen sie bei der Vor- und Kleinserienfertigung der klein bis mittelgroßen Teile sehr interessant. Daher ist der Einsatz dieser Verfahren zur Herstellung im tatsächlichen Material besonders für Vorserienentwicklung und Ersatzteilbeschaffung in kleinen Stückzahlen äußerst sinnvoll.

### 4 Literatur

- Diplomarbeit, H.C. Turan, „Evaluierung einer Low Cost Tooling Prozesskette zur Fertigung von Spritzgusskleinserien“, 2002
- Gebhardt, Rapid Prototyping



## Einsatz von Backpropagation-Netzen zur Abbildung des Rückfederungsverhaltens bei der Feinblechumformung

Tawil, M.

*Im vorliegenden Artikel werden künstliche neuronale Netze (KNN) als Werkzeug zur Abbildung der Zusammenhänge während des Tiefziehprozesses vorgestellt. Der Fokus der im Rahmen eines DFG-Forschungsprojektes durchgeführten Untersuchung lag dabei auf KNN-Varianten, die auf dem am meisten verbreiteten Backpropagation-Algorithmus basieren. Der entscheidende Vorteil dieses Lernalgorithmus ist, nichtlineare Systeme durch sogenannte Eingabe-Ausgabe-Vektoren abzubilden und daher Ingenieurwissen direkt in die Netzstruktur einzubinden.*

*In the article at hand artificial neural networks, used as tools for the illustration of interrelationships during deep drawing, will be presented. The focus of the study, which was part of a DFG-research project, was placed on neural network variants that are based on the most widespread backpropagation algorithm. The crucial advantage of this learning algorithm is the capability to map non-linear systems using so called input-output vectors, thereby including engineering knowledge directly in the network structure.*

### 1 Einleitung

Die Maßhaltigkeit bzw. Rückfederung tiefgezogener Blechteile spielt eine zentrale Rolle bei der Beurteilung der Tiefziehprozess-Genauigkeit. Eine hundertprozentige Beherrschung dieses Verfahrens stellt für die blechverarbeitende Industrie, insbesondere die Automobilhersteller und ihre Zulieferer eine große Herausforderung dar. Dabei ist die Bauteilmaßhaltigkeit ein wichtiger Faktor nicht nur bei der Gewährleistung der fehlerfreien Montage und Fügbarkeit. Auch der Automatisierungsgrad mehrerer hintereinander geschalteter Fertigungs- und Montageschritte hängt stark von der Genauigkeit der gefertigten Blechteile ab.

Am Ende des Umformvorganges erfahren die Blechteile eine dreidimensionale, inhomogene Formänderung. Die Ursache hierfür liegt im elastisch-plastischen Verhalten der Bleche,

welches nach dem Krafrückgang des Werkzeuges eine Rückfederung des tiefgezogenen Werkstückes hervorruft. Somit ist die Rückfederung eine den Kaltumformprozess begleitende Formabweichung, die verringert, korrigiert oder zumindest berücksichtigt werden muss. Dies ist mit enormem technischem und wirtschaftlichem Aufwand verbunden /1/, da die Rückfederung von einer sehr großen Anzahl von Einflussgrößen abhängig ist.

Die analytische Ermittlung der Gestaltänderung von Tiefziehteilen ist sehr kompliziert und basiert auf vereinfachten mathematischen Modellen, so dass eine genaue Aussage über die Fertigungstoleranzen wie sie heute gefordert werden, nicht möglich ist. Erst der Einsatz von Finite Elemente (FEM) Programmen zur Simulation des Umformvorganges ermöglichte gute Ergebnisse bezüglich der Dehnungsverteilung /2/. Bei der Rückfederungssimulation jedoch stoßen diese numerischen Lösungen an ihren Grenzen und liefern bei großem Aufwand und langer Erfahrung nur für einfache Blechteile befriedigende Aussagegenauigkeit. Dies liegt zum einen an den den Programmen zu Grunde liegenden Werkstoffmodellen, die dem tatsächlichen Werkstoffverhalten nicht genügen /3/.

Die vorhandenen Lösungen zur Berechnung der Rückfederung nach dem Tiefziehen reichen aus heutiger Sicht nicht aus, um qualitativ hochwertige Produkte aus Feinblech herzustellen. Der Einsatz von KNN soll hier Abhilfe schaffen. Die hervorragende Eignung von KNN zur Lösung technischer Problemstellungen liegt hauptsächlich an folgenden positiven Eigenschaften:

- Approximation komplexer nichtlinearer Zusammenhänge, ohne die Notwendigkeit eines mathematischen Modells, da das Lernen musterbasierend erfolgt
- Eliminieren geringer Datenstreuung
- Fehlertoleranz gegenüber teilweise fehlerhaften Daten
- Sehr gute Interpolations- und adäquate Extrapolationsfähigkeit

- Die Gewährleistung einer realitätsgetreuen Prozesssimulation beim Trainieren mit Daten, die der Realität entstammen
- Generalisierungsfähigkeit

Diesen Vorteilen stehen einige Nachteile gegenüber:

- Die fehlende Transparenz der in den Netzen stattfindenden Lernvorgänge erschwert die Nachvollziehbarkeit der Netzergebnisse
- Es existieren keine allgemein gültigen Theorien zur Konstruktion künstlicher neuronaler Netze

Insbesondere bei der Auswahl der geeigneten Netzkonfiguration wird vom Anwender sehr viel Erfahrung im Umgang mit dem jeweiligen Netztyp abverlangt. Fehlt diese, vergeht sehr viel Zeit, bis die optimale Konfiguration gefunden wird. Ein weiterer Aspekt, der in der Vergangenheit von vielen Anwendern wenig Beachtung bekam, ist die Beschaffenheit des der Trainingsphase zu Grunde liegenden Datensatzes. Ist in diesem der vom Netz zu beschreibende Sachverhalt nicht korrekt wiedergegeben, scheitert die Anwendung unweigerlich. Aus den genannten Gründen wurden KNN zur Lösung einiger Problemstellungen unberechtigt Weise als ungeeignet bezeichnet. Dabei hätte dort allein eine adäquate Datenaufbereitung zu einem positiven Urteil geführt.

Ziel des Projektes war daher, die Konstruktion eines Netzes zur Rückfederungsberechnung verschiedener Bauteilgeometrien mit variabler Blechstärke basierend auf realen Experimenten. Zu diesem Zweck wurden Netze mit den drei am häufigsten verwendeten Modifikationen der Standard-Backpropagation-Lernregel untersucht:

- Backpropagation mit Momentum
- Backpropagation mit adaptiver Lernrate und Momentum
- Resilient Propagation

Dabei wurden bei jedem Netztyp nach einem vollfaktoriellen Berechnungsplan verschiedene Variationen der Netztopologie und Lernparameter durchgerechnet. Abschließend wurden die Leistungsfähigkeiten der drei Algorithmen bei der Abbildung des Tiefziehprozesses miteinander verglichen.

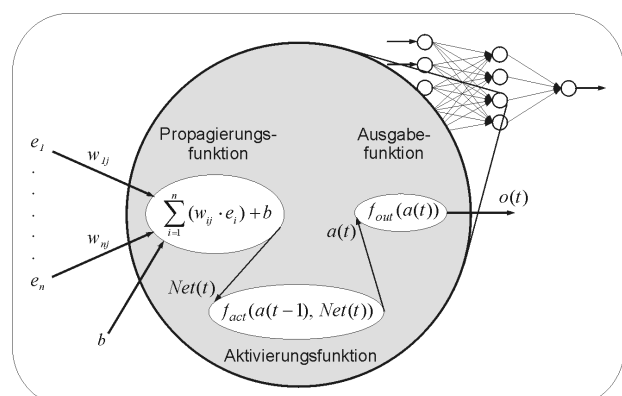
Im folgenden wird der allgemeine Aufbau und die prinzipielle Arbeitsweise von Backpropagation-Netzen kurz beschrieben, um anschließend die Untersuchungsergebnisse vorzustellen.

## 2 Arbeitsweise der Backpropagation-Netze

Beim Backpropagation-Algorithmus handelt es sich um ein numerisches Lernverfahren zum überwachten Trainieren vorwärtsgerichteter, mehrschichtiger KNN. In den letzten Jahrzehnten wurde der Backpropagation-Algorithmus, angepasst an die jeweilige Problemstellung, von verschiedenen Forschern als Lernregel für unterschiedliche Netzarten implementiert. Heute existiert eine Vielzahl solcher Netze, die unter dem Sammelbegriff „Backpropagation-Netze“ bekannt sind. Sie unterscheiden sich im wesentlichen durch die zum Lernen verwendete Variante des Backpropagation-Algorithmus.

### 2.1 Netzaufbau

Backpropagation-Netze bestehen, in Anlehnung an das biologische Nervensystem aus vielen Einheiten, den Neuronen, die in einer oder mehrerer Schichten miteinander vernetzt sind und unabhängig voneinander denkbar einfache Rechenoperationen durchführen [4, 5]. Prinzipiell kann ein Neuron als eine autonom agierende Schaltung verstanden werden, welche eine Ausgabe erzeugt, wenn der kumulative Effekt der Eingabereize einen bestimmten Schwellenwert, den sog. „Biaswert“  $b$  übersteigt (**Bild 1**). Resultierend daraus gilt, dass es für jeden Eingabezweig externe Eingabesignale oder Reize sowie eine entsprechende Gewichtung gibt. Jeder von außen ins Neuron eingehende Wert  $e$  wird mit einem Gewicht  $w$  multipliziert. Dabei kann dieser Wert (Signal) vom Anwender an der Eingabeschicht festgelegt worden sein oder, falls es sich nicht um ein Eingabeneuron handelt, die Ausgabe eines vorgeschalteten Neurons sein. Durch die Gewichtung wird das Signal entweder geschwächt oder verstärkt dem Neuron präsentiert.

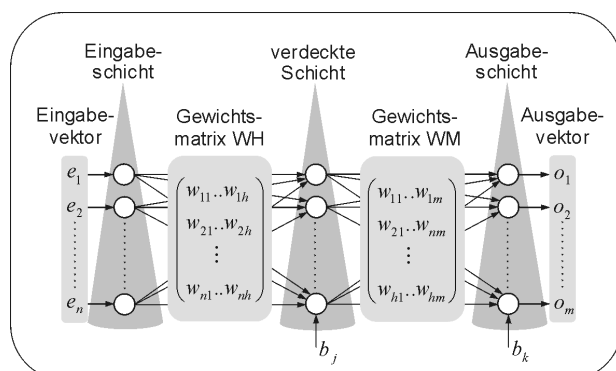


**Bild 1:** Modell eines künstlichen Neurons

Zur Erzeugung der Neuronenausgabe  $o(t)$  müssen die Eingabewerte mehrere mathematische Funktionen durchlaufen. So wird mit der Übertragungsfunktion, Propagierungsfunktion genannt, die Gesamtfremderregung des Neurons durch Zusammenfassung der Eingangssignale zum Zeitpunkt  $t$  ermittelt. Diese Zusammenfassung kann durch Addition, Produktbildung oder Bildung des Maximal- oder Minimalwertes der gewichteten Eingaben geschehen, wobei in den bekannten Neuronen die Summation als Rechenoperation am häufigsten verwendet wird. Das Ergebnis dieser Berechnung  $Net(t)$  wird im nächsten Schritt transformiert. Die Transformationsvorschrift besagt, dass mit einer Aktivierungsfunktion festgelegt wird, wie sich aus dem vorherigen Aktivierungszustand  $a(t-1)$  und der momentanen Gesamtfremderregung  $Net(t)$  ein neuer Aktivierungszustand  $a(t)$  des Neurons berechnen lässt. Anschließend wird mit der Ausgabefunktion  $f_{out}(a(t))$  der Neuronenausgang  $o(t)$  ermittelt, der den nachfolgenden Neuronen als Eingabe dient oder, wenn es sich um ein Ausgabeschichtneuron handelt, als endgültige Netzausgabe gilt.

Ein Backpropagation-Netz besteht, wie in **Bild 2** gezeigt, aus einer Eingabeschicht, einer oder mehrerer verdeckter Schichten und einer Ausgabeschicht. Die jeweiligen Schichten verfügen über eine je nach Anwendungszweck unterschiedliche Anzahl von Neuronen, die innerhalb der Schicht keine Verbindungen untereinander aufweisen. D.h. es bestehen lediglich Verbindungen von den Neuronen einer Schicht zu den Neuronen der nachfolgenden Schicht.

Die Neuronen der Eingabeschicht dienen zum Repräsentieren der Daten. Sie leiten die Eingangsgrößen unverändert an die versteckten Schichten weiter. Dabei wird die Ausgabe eines jeden Eingabeneurons mit einem Gewichtungsfaktor multipliziert und an alle Neuronen der versteckten Schicht verteilt.



**Bild 2:** Topologie eines Backpropagation-Netzes

Jedes Neuron der versteckten Schicht erhält eine definierte Anzahl von gewichteten Eingängen, die der Anzahl der Eingabeneuronen entspricht. Zusätzlich zur Produktsumme aus Eingaben und Gewichtungsfaktoren geht bei einigen Anwendungen ein Biaswert  $b_j$  in die Berechnung der Propagierungsfunktion jedes einzelnen Neurons ein. In den Neuronen der versteckten Schichten findet die eigentliche Informationsverarbeitung statt. Die Anzahl der versteckten Schichten sowie die darin enthaltenen Neuronen, die nichtlineare Aktivierungsfunktionen berechnen können, beeinflussen das Netzverhalten massiv und müssen daher sorgfältig gewählt werden. Backpropagation-Netze verfügen über mindestens eine versteckte Schicht zur Abbildung beliebiger nichtlinearer Zusammenhänge. Bei komplexen Netzwerken sind mehrere verdeckte Schichten durchaus möglich. Die Gewichtungsfaktoren an der Schnittstelle zwischen der Eingabeschicht und der ersten versteckten Schicht bilden die Gewichtsmatrix  $WH$  und werden in der Regel, wie alle Gewichtungsfaktoren des Netzes, am Anfang der Trainingsphase zufällig initialisiert.

Die Ausgaben der ersten verdeckten Schicht werden gewichtet an die nachfolgenden Schichten, beispielsweise die Ausgabeschicht weitergeleitet. Letztere dient zur Ausgabe der vom Netzwerk erzeugten Antworten auf die Eingabewerte. Die Anzahl der Ausgabeschichtneuronen entspricht meist der Anzahl der vom Netz zu erzeugenden Ausgaben. Die Gewichtungsfaktoren auf den Verbindungen zwischen der letzten versteckten Schicht und der Ausgabeschicht sind in der Gewichtsmatrix  $WM$  zusammengefasst. Außerdem erhält in manchen Fällen jedes Neuron dieser Schicht einen Biaswert  $b_k$ .

## 2.2 Lernprozess bei Backpropagation-Netzen

Bevor ein Netz zur Berechnung einer bestimmten Ausgabe eingesetzt werden kann, müssen zwei Phasen (Training und Validierung) abgearbeitet werden. In der Trainingsphase wird dem Netz eine Trainingsmenge, bestehend aus Eingabe- und Ausgabepaaren, präsentiert. Das Netz lernt den in der Trainingsmenge vorhandenen Sachverhalt, in dem der Anwender ihm mitteilt, welche Ausgabe erwartet wird, wenn eine bestimmte Eingabe vorliegt. Die Abbildungsgenauigkeit des Netzes wird durch die Abweichung der errechneten Netzausgaben von der vorgegebenen Soll-Ausgabe definiert. Die Validierungsphase dient zur

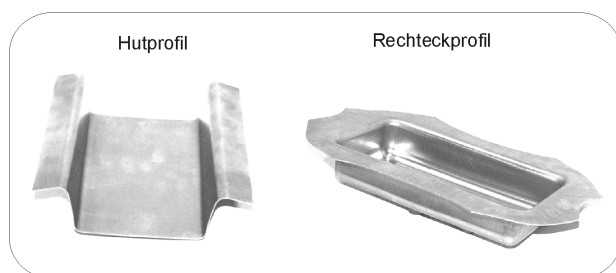


Überprüfung der Generalisierungsfähigkeit des gerade trainierten Netzes. Dabei präsentiert der Anwender dem Netz Eingabedaten, die in der Trainingsmenge nicht enthalten waren und somit für das Netz unbekannt sind. Erst wenn das Netz das gelernte Wissen gut verallgemeinern kann, ist der Lernprozess abgeschlossen. Das während des Lernprozesses vom Netz erlangte Wissen ist in der Netzstruktur und in den Gewichtungsfaktoren, mit denen die Neuronenverbindungen belegt sind, dauerhaft gespeichert.

Der Lernprozess spielt sich in der wichtigsten und gleichzeitig aufwendigsten Trainingsphase ab. Das Lernen wird beim Backpropagation-Algorithmus in drei Schritten vollzogen. Zunächst erfolgt die Berechnung der Netzausgabe über alle Netzschichten von links nach rechts. Im zweiten Schritt wird die Differenz (der Netzfehler) zwischen errechneter und gewünschter Ausgabe gebildet. Um den Netzfehler zu minimieren, wird er im dritten Schritt ausgehend von der Ausgabeschicht an die vorgeschalteten Schichten zurückgegeben, wobei die Gewichtungsfaktoren nach einer Lernvorschrift iterativ angepasst werden. Das Ziel des Backpropagation-Algorithmus ist, Netzgewichte zu finden, die den Netzfehler minimieren.

### 3 Abbildung des Tiefziehprozesses mittels Backpropagation-Netze

Im Rahmen der durchgeführten Untersuchung wurde das Rückfederungsverhalten tiefgezogener Bauteile aus Feinblech basierend auf realen Experimenten mit Hilfe von Backpropagation-Netzen prognostiziert. Zu diesem Zweck wurden nach einem statistischen Versuchsplan zwei Tiefziehgeometrien (**Bild 3**) unter Variation verschiedener Prozessparameter und Blechstärken hergestellt.



**Bild 3:** Untersuchte Tiefziehgeometrien

Die hergestellten Werkstücke wurden bezüglich ihrer Rückfederung vermessen. Es entstand ein statistisch gesicherter Datensatz, der die Tiefziehrealität beinhaltet. Mit diesem Datensatz

konnten drei verschiedene Netztypen, die mit unterschiedlichen Modifikationen des Backpropagation-Algorithmus arbeiten, trainiert werden. Im folgenden werden die Simulationsergebnisse der jeweiligen Netztypen vorgestellt.

#### 3.1 Backpropagation mit Momentum (BP-M)

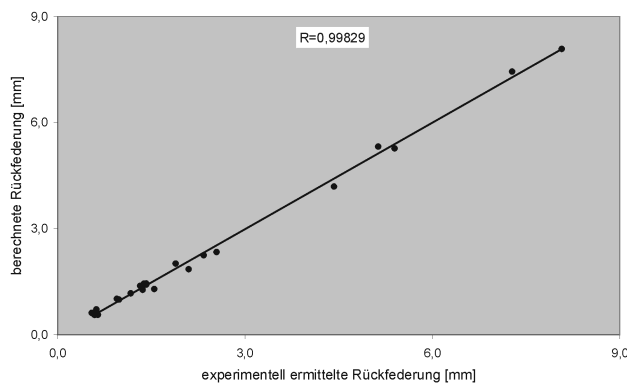
Der hier behandelte Lernalgorithmus verwendet zur Gewichtsänderung eine konstante Lernrate und einen sog. Momentum-Term. Zur Ermittlung der besten Netzkonfiguration für die vorliegende Aufgabenstellung wurden die Neuronenzahlen in der Zwischenschicht, die Lernrate und das Momentum variiert. Dazu wurden für die betrachteten Parameter unterschiedliche Einstellwerte berücksichtigt. Es wurden für sämtliche Berechnungen jeweils 10000 Iterationsschritte festgelegt. In Voruntersuchungen für die vorliegende Problemstellung wurden Netze mit mehr als einer Zwischenschicht betrachtet. Diese lieferten schlechtere Ergebnisse im Vergleich zu Netzen mit nur einer verdeckten Schicht. Aus diesem Grund wurden hier ausschließlich Netze mit einer verdeckten Schicht betrachtet.

Für die Neuronenaktivierung in der Zwischenschicht wurde die logistische Signalfunktion und in der Ausgabeschicht die Identität ausgewählt. Diese eigneten sich sehr gut zur Lösung ähnlicher Aufgabenstellungen. Zur Berechnung des Netzfehlers wurde der mittlere quadratische Fehler (MSE) bei allen Netzen verwendet. Das error goal wurde mit 0,005 angegeben.

Die Kombinationen aller Parameterstufen wurden nach einem vollfaktoriellen Berechnungsplan ermittelt. Dieser ergab bei 4 Einstellwerten für die Neuronenzahl, 5 Einstellwerten für die Lernrate und 4 Einstellwerten für das Momentum 80 unterschiedliche Netzkonfigurationen. Dadurch erhöht sich zwar der Rechenaufwand erheblich, jedoch kann nur so die Berücksichtigung aller möglichen Parameterkombinationen gewährleistet werden. Für jede Netzkonfiguration wurden, um die Trainingsergebnis-Schwankungen aufgrund der zufälligen Gewichtsinitialisierung zu verringern, fünf Durchläufe durchgeführt. Am Ende eines jeden Trainings wurde das jeweilige Netz mit dem speziell hierfür vorbereiteten Testdatensatz bezüglich seiner Generalisierungsfähigkeit getestet.

### 3.1.1 Simulationsergebnis

Bei der Anwendung dieses Algorithmus zur Berechnung der Rückfederung erreichte, unter den 80 durchgeführten Berechnungen ein Netz mit 5 Zwischenschichtneuronen, einer Lernrate von 0,1 und einem Momentum von 0,3 den geringsten Generalisierungsfehler von 4,2%. Das error goal wurde hier nach 5000 Iterationsschritten in 50 Sekunden unterschritten. Der Generalisierungsfehler wurde anhand des Testmusters im Validierungsdatensatz berechnet. In **Bild 4** sind die vom Netz errechneten Rückfederungswerte gegen die experimentell ermittelten aufgetragen. Aus diesem Diagramm lässt sich eine sehr gute Korrelation der beiden Ergebnisse mit dem Korrelationskoeffizienten  $R=0,9983$  ablesen.



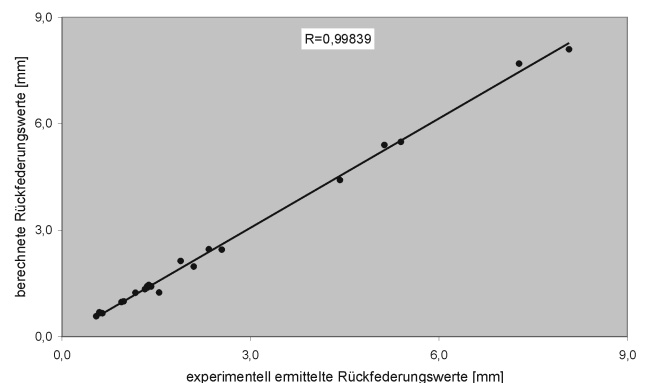
**Bild 4:** Berechnungsergebnis des BP-M-Netzes im Vergleich zum Experiment

### 3.2 Backpropagation mit adaptiver Lernrate und Momentum (BP-AM)

Dieses Verfahren unterscheidet sich vom BP-M lediglich durch die hier veränderliche Lernrate. Aus diesem Grund verlief die Untersuchung analog zu der im letzten Abschnitt durchgeführten, so dass die dort erstellten Netzkonfigurationen für den hier betrachteten BP-AM-Algorithmus übernommen wurden. Die Variabilität der Lernrate bringt zwei weitere Lernparameter, den Lernratenerhöhungsfaktor  $\eta^+$  und Lernratenverringerrungsfaktor  $\eta^-$ , mit sich. Die Werte dieser Faktoren wurden für alle Berechnungen mit 1,05 und 0,7 angegeben, da Vorberechnungen mit hiervon abweichenden Werten keine signifikante Verbesserung der Trainingsergebnisse zeigten.

### 3.2.1 Simulationsergebnis

Der niedrigste Generalisierungsfehler (4,0%), der mit diesem Algorithmus erreicht wurde, ergab sich für ein Netz mit fünf Zwischenschichtneuronen, einer Lernrate von 0,1 und einem Momentum von 0,95. Das error goal wurde hier nach 2500 Iterationsschritten und 25 Sekunden Trainingsdauer erreicht. Die von diesem Netz berechneten Rückfederungen wurden denen nach dem Versuch gemessenen in **Bild 5** gegenübergestellt. Bei diesem Vergleich ergab sich ein Korrelationskoeffizient von 0,9984.



**Bild 5:** Berechnungsergebnis des BP-AM-Netzes im Vergleich zum Experiment

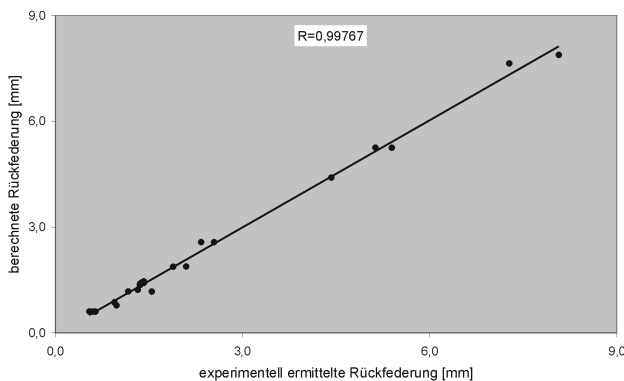
Bemerkenswert ist bei diesem Algorithmus die im Vergleich zum BP-M schnellere Konvergenz. Dies liegt sicherlich an der adaptiven Lernrate, die sich der Fehleroberfläche während des Lernprozesses anpasst. Die übrigen Feststellungen für das BP-M-Verfahren haben sich auch hier bewahrheitet.

### 3.3 Resilient Propagation (RProp)

Für die Simulation des Tiefziehprozesses mit Netzen, die den RProp-Algorithmus als Lernregel verwenden, wurden verschiedene Netzkonfigurationen durchgerechnet. Dabei wurde zum einen die Anzahl der verdeckten Schichten mit den darin enthaltenen Neuronen variiert. Für die Berechnung sämtlicher Netzkonfigurationen wurde der Schrittweiterrhöhungsfaktor  $\eta^+$  mit 1,2, der Schrittweiterrückgangsfaktor  $\eta^-$  mit 0,5, die Schrittweiterrückgangsobergrenze  $\Delta_{max}$  mit 50 und die Schrittweiterrückganguntergrenze  $\Delta_{min}$  mit 0,07 angegeben. Die Berechnung des Netzfehlers erfolgte nach dem mittleren quadratischen Fehler (MSE). Es wurde ein error goal von 0,005 vordefiniert. Die maximal durchzuführenden Iterationsschritte wurden mit 10000 festgelegt.

### 3.3.1 Simulationsergebnis

Die Kombination aller Parameterstufen nach einem vollfaktoriellen Berechnungsplan ergab in diesem Fall 15 unterschiedliche Netzkonfigurationen. Auffällig ist bei diesem Algorithmus seine extrem schnelle Konvergenz bei Zunahme der Neuronenzahl in der verdeckten Schicht. Dabei ist es gleichgültig, über wie viele verdeckte Schichten das Netz verfügt. Anhand der erzielten Generalisierungsfehler lässt sich erkennen, dass eine Zwischenschicht für die vorliegende Aufgabenstellung völlig ausreichend ist. Die Verwendung von mehreren Schichten führte sogar zu erheblich schlechteren Ergebnissen. So wurde das beste Ergebnis (4,3%) mit einem Netz erzielt, das 3 Neuronen in der verdeckten Schicht verwendete. Die Berechnung wurde nach 10000 Iterationsschritten unterbrochen, da das error goal immer noch erreicht war. Netze mit mehr Neuronen in der Zwischenschicht (z.B. 7) unterschritten das error goal bereits nach 155 Iterationen. Die Berechnung dauerte hier lediglich 2 Sekunden. Allerdings war diese kurze Rechendauer mit einer Verschlechterung des Generalisierungsfehlers (6,1%), im Vergleich zum 3-Neuronen-Netz, verbunden.



**Bild 6:** Berechnungsergebnis des RProp-Netzes im Vergleich zum Experiment

Der Vergleich experimentell ermittelter Rückfederungswerte mit denjenigen, die mit dem besten Netz berechnet wurden, ist in **Bild 6** gezeigt. Aus diesem Vergleich ging ein, im Vergleich zu den vorhergehenden Verfahren, niedrigerer Korrelationskoeffizient von 0,99767 hervor.

### 3.4 Leistungsfähigkeit der Algorithmen

Anhand der Simulationsergebnisse der verwendeten Backpropagation-Algorithmen kann festgestellt werden, dass sich die drei Verfahren zur

Abbildung des Rückfederungsverhaltens tiefgezogener Bauteile aus Feinblech gut eignen. Vergleicht man die erzielten Generalisierungsfehler, resultiert, dass sich der BM-AM-Algorithmus für diese Problemstellung die besten Ergebnisse liefert. Dies bezieht sich auch auf die benötigte Trainingsdauer zum Erreichen des vorgegebenen error goals. Die im Vergleich zu den anderen Verfahren beste Leistungsfähigkeit dieses Algorithmus beruht auf der Verwendung einer adaptiven Lernrate, die sich der Fehleroberfläche anpasst. Dadurch wird die Verfahrenseffizienz bei der Suche nach Fehlerminima gesteigert.

## 4 Zusammenfassung

Die im Rahmen dieser Arbeit eingesetzten neuronalen Netze konnten nach einer maximalen Trainingsdauer von 90 Sekunden eine durchschnittliche Vorhersagegenauigkeit für unbekannte Eingabeparameter von 95% realisieren. In Anbetracht der relativ geringen Anzahl der verwendeten Trainingsmuster auf der einen und der Komplexität des Tiefziehprozesses auf der anderen Seite, kann dieses Ergebnis als sehr gut bezeichnet werden. Dies gilt in besonderem Maße, wenn man die Leistungsfähigkeit der neuronalen Netze mit der der numerischen Methoden vergleicht. Dort werden für ähnliche Fertigungsfälle unter großem Aufwand und mit entsprechendem know how Vorhersagegenauigkeiten weit unter 90% erzielt.

## 5 Literatur

- /1/ Roll, K.; Rohleder, M.: Simulation der Rückfederung in der Blechumformung, zweites Industriekolloquium SFB 362 „Fertigen in Feinblech“, Clausthal-Zellerfeld, 2000
- /2/ Doege, E.; Seidel, H.-J.; Schmidt-Jürgensen, R.: Vorhersage der Rückfederung tiefgezogener Blechbauteile mit FAST\_FORM3D, 19<sup>th</sup> CAD-FEM Users' Meeting 2001, International Congress on FEM Technologie, Berlin, Potsdam, 2001
- /3/ Baumgart, H.; Deinzer, G.H.: Neue Werkstoffe in der Automobil-Großseriefertigung, drittes Industriekolloquium SFB 362 „Fertigen in Feinblech“, Clausthal-Zellerfeld, 2002

- /4/ Reuter, M.: Medizinische Signalverarbeitung,  
in: Lehmann, T. M.; Meyer zu Bexten, E.:  
Handbuch der Medizinischen Informatik, Carl  
Hanser Verlag, München, Wien, 2002
- /5/ Scherer, A.: Neuronale Netze, Grundlagen  
und Anwendungen, Vieweg Verlag,  
Braunschweig / Wiesbaden, 1997

# PRIME - Produktwissensmanagement in fertigenden Unternehmen

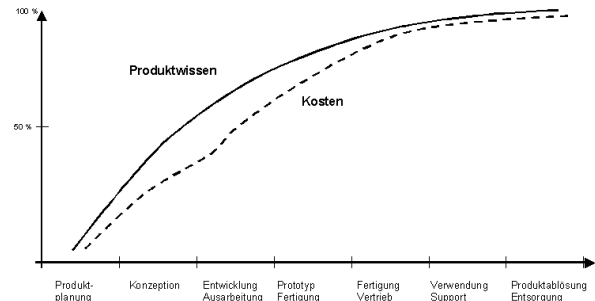
Düsing, C., Kamel, N.

*Wissensmanagement, insbesondere im Bereich der Produktentwicklung, ist zwar in aller Munde aber meistens viel zu abstrakt und unpraktikabel um tatsächlich Anwendung in der Industrie zu finden. Das europäische Forschungsprojekt PRIME (Product Integrated Knowledge Management for the Extended Enterprise) beschäftigt sich mit der Entwicklung einer anwendbaren Produktwissensmanagementlösung für die Investitionsgüterindustrie innerhalb und über die Grenzen von Unternehmen hinaus. Hier sollen kurz die Ziele und Lösungsansätze sowie erste Ergebnisse vorgestellt werden.*

*Knowledge Management is well known, especially in the area of product development, but seldom used because of its high level of abstraction and low level of usability. PRIME (Product Integrated Knowledge Management for the Extended Enterprise) is a European research project, and its main objective is to develop a practical, industrially applicable product knowledge management system for the extended enterprise. This article illustrates the objectives and approaches as well as some first results of the research work done until now.*

## 1 Einleitung

Ingenieure jeder Fachrichtung sind als Entwickler von Produkten zunehmend am Einsatz von Wissensmanagement interessiert. Gerade in fertigenden Unternehmen sind jedoch bedeutend mehr Personen im Umgang mit den Produkten eingebunden, entweder in verschiedenen Abteilungen oder sogar die Grenzen der Firma in Kooperation mit anderen Unternehmen /1/. Für ein den gesamten Produktlebenszyklus umfassendes Wissensmanagement sollte jedoch auch der Kunde oder der spätere Recycler des Produkts eingebunden werden. Im **Bild 1** ist schematisch die Abhängigkeit des Produktwissens vom Produktlebenszyklus dargestellt. Während das Wissen in der Planungs- und Entwicklungsphase stark zunimmt, ist der Anstieg in den weiteren Phasen weniger stark ansteigend, beträgt in der Regel jedoch noch immer bis zu 50 % des gesamten Produktwissens. Der Verlauf der Investitionen in die Produktentwicklung und in die



**Bild 1:** Produktwissen und Kostenintensität eines Produktes über den Produktlebenszyklus (nach /2/).

somit verbundenen Folgekosten bei Änderung eines Produktes verläuft ähnlich. Aus diesem Verlauf ergibt sich somit folgerichtig, dass der Einfluss von Produktwissen aus späteren Produktlebenszyklusphasen sich insbesondere in der Entwicklung neuer und Nachfolgeprodukte rentiert. Denn dadurch kann durch Verwendung von existierendem Wissen zum einen die Entwicklungszeit verkürzt werden, zum anderen wird die Qualität des Produktes verbessert. Die finanziellen Auswirkungen liegen hier vor allem in den Einsparungen in der Betriebs- und Wartungsphase, da auf Grund erhöhter Qualität weniger Rückläufer und Beanstandungen zu erwarten sind. Diese Behauptung soll im folgenden Abschnitt beispielhaft erläutert werden.

## 2 Versionsübergreifende Wissensverarbeitung am Beispiel

Eine Firma Müller stellt Mühlen und Silos verschiedener Bauarten und Typen für die Getreideverarbeitung her. Die Montage der Produkte werden von der Montagefirma Montabauer durchgeführt. Hierbei stellt die Montage einen wesentlichen Kostenfaktor dar, da sie in der Regel sehr zeit- und arbeitsaufwendig ist. Man greife jetzt hier einen bestimmten Arbeitsschritt heraus, so z.B. die Montage der Abdeckungsbleche der Förderbänder. Bei der Analyse dieses Bereiches würde man beispielsweise feststellen, dass durch eine Vielzahl von Verstellmöglichkeiten an der (Fein-)Justage der Abdeckung die Monteure z. T. von der

Unübersichtlichkeit der Justagemöglichkeiten überfordert sind und auch gegensinnig arbeiten. Dies führt dazu, dass die zuvor kalkulierte Zeit für diesen Arbeitsschritt um zum Teil mehr als das Doppelte überschritten wird. Eine integrative Wissensmanagementlösung kann hier Abhilfe schaffen: Zum einen kann der Konstrukteur bei genauer Kenntnis des Sachverhalts bei der nächsten Version des Produkts durch Vereinfachung des Verstellmechanismus hier gezielt einschreiten und so den Montageprozess beschleunigen und verbessern. Bei exakter Dokumentation und somit Montageanleitung für jedes Produkt und in Konsequenz auch jede Version eines Produktes, dass heißt bei dynamischem Produktwissen, ist es dann im Gegenzug den Monteuren deutlicher leichter den Montageprozess zu verstehen und gezielter zusammenzuarbeiten.

Wesentliche Faktoren bei einer Produktwissensmanagementlösung für diesen Bereich sind:

- Abteilungs- bzw. firmenübergreifende Verteilung des Wissens.
- Allgemeinverständliche Aufbereitung des Wissens.
- Dynamische Verwaltung des Produktwissens.

Auf weitere Anforderungen an ein solches Produktwissensmanagementsystem soll im nächsten Abschnitte genauer eingegangen werden.

Das Europäische Forschungsprojekt PRIME (Product Integrated Knowledge Management for the Extended Enterprise), welches sich exakt mit Entwicklung eines solchen Systems beschäftigt, soll im folgenden Abschnitt vorgestellt werden.

### 3 Das PRIME Projekt

Seit April diesen Jahres wird das von der Europäischen Kommission geförderte PRIME Projekt durchgeführt. Es nehmen Partner aus vier verschiedenen europäischen Ländern teil (siehe **Bild 2**).

Die wissenschaftliche Leitung des Projektes wird durch die Forschungsinstitutionen TU Clausthal (Institut für Maschinenwesen), Labein, eine spanische Forschungseinrichtung und EADS CCR, die Forschungsgesellschaft des Luft- und Raumfahrtkonzerns, gestellt. Um die spätere industrielle Anwendbarkeit gewährleisten zu können, sind die Industriepartner MBES, ein

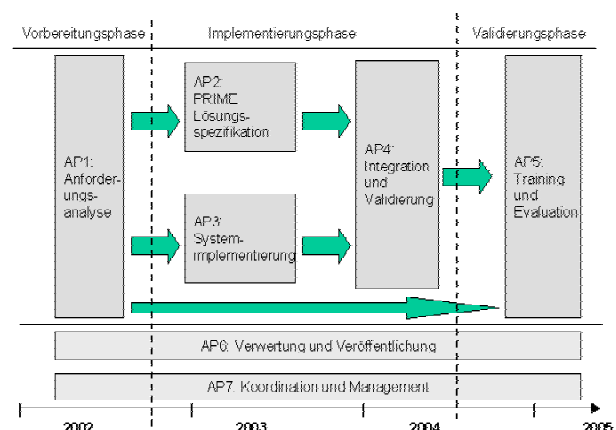
britischer Maschinenbaukonzern, Stöbich, ein Hersteller von Brandschutzanlagen aus Goslar, Deutschland, sowie EADS CCR mit industriellen Anwendungsszenarios vertreten, welche die Grundlage für die Entwicklung des Systems darstellen. Der VDMA schließt das Konsortium als



**Bild 2:** Die Partner des PRIME Projektes

Vertreter des deutschen Anlagen- und Maschinenbaus ab.

Das dreijährige Projekt ist prinzipiell in drei Phasen aufgeteilt: Vorbereitung, Implementierung und Validierung (siehe hierzu auch **Bild 3**). In der Vorbereitungsphase wurde eine umfassende Analyse der Anforderungen an ein solches Wissensmanagementsystem durchgeführt. Diese Anforderungen wurden im Einzelnen aus industriellen Anwendungsszenarios und einer Umfrage gewonnen.



**Bild 3:** Projektverlaufsübersicht

An der Umfrage haben nahezu 70 europäische Unternehmen aus den Bereichen Maschinenbau, Automobil- und Luftfahrtindustrie teilgenommen.

Die wesentlichen Fragestellungen waren bezüglich des aktuellen oder möglichen Einsatz von Produktwissensmanagementsystem und der Anforderungen an solche Systeme. Erstaunlich scheint die Feststellung, dass über 40 % der befragten Unternehmen den Wert des Expertenwissens ihrer Angestellten zwischen 20.000 € und 40.000 € pro Angestellten und Jahr einschätzen. Dies zeigt zum einen, wie wichtig es ist, das Wissen innerhalb der eigenen „Konzernwände“ zu halten, zum anderen aber auch die Notwendigkeit das Potenzial des Wissens effizient auszunutzen zu können. Gerade hier kann eine praktikable Wissensmanagementlösung einen entscheidenden Wettbewerbsfaktor darstellen. Die detaillierten Ergebnisse der Umfrage sind unter /3/ veröffentlicht.

Die wesentlichen Anforderungen an eine mögliche Produktwissensmanagementlösung sind aus industriellen Anwendungsszenarios abgeleitet worden. Diese Szenarios wurden von den Industriepartnern MBES, EADS CCR und Stöbich Brandschutz sowie Mann + Hummel als VDMA Mitglied ausgearbeitet und zur Verfügung gestellt. Ziel der Anforderungsermittlung aus den Anwendungsfällen ist es, das PRIME - Produktwissensmanagementsystem so industrienah und zielorientiert wie möglich zu entwickeln. Gerade aus diesem Grund war es wichtig, die Anwendungsfälle so zu wählen, dass sie einen grossen Teil der Investitionsgüterindustrie abdecken können. So ist die Bandbreite der Anwendungsfälle hoch gewählt. Bei dem Anwendungsfall der EADS handelt es sich zum Beispiel um einen Flugzeugmotor, der in Kleinserien in maximal dreistelliger Anzahl gefertigt wird. Der Nirvana Luftkompressor ist der Fall von MBES, welcher in zigtausenden von Motoren eingebaut wird. Die Stöbich Brandschutz GmbH hat aus ihrem Sortiment ein automatisches Rauchschutzhangsystem ausgewählt. Dies wird zwar auch in relativ hoher Stückzahl angefertigt, jedoch sind die Rahmenbedingungen des Einbaus jedesmal anders, so dass hier auf eine andere Phase des Produktlebenszyklus fokussiert wird. Von Mann + Hummel kommt ein Luftfilter als

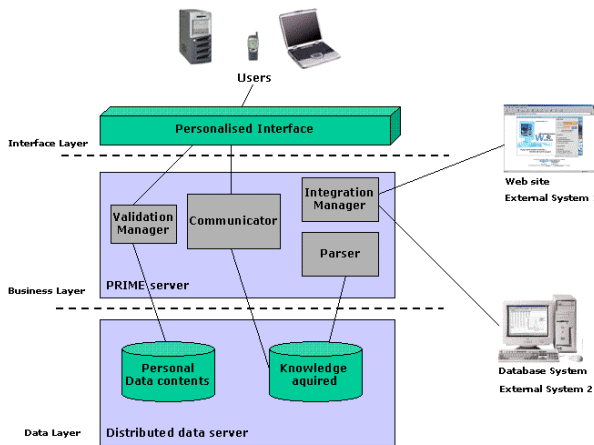
Anwendungsfall in Betracht. Dieses Produkt ist im Vergleich zu den anderen in Großserie gefertigt und wird in hunderttausenden von Motoren eingebaut.

Aus diesen Anwendungsfall lassen sich allgemeine Beschreibungen über Produkte aus der Investitionsgüterindustrie ableiten und somit decken diese einen grossen Teil möglicher Anwendungsfälle ab. Außerdem wurde in diesen Szenarios im Wesentlichen auf den Wissensfluss zwischen den einzelnen Produktlebenszyklusphasen eingegangen, das heisst im Besonderen auch zwischen einzelnen Personen, Abteilungen, Firmen oder aber auch dem späteren Kunden oder Entsorger des Produkts.

Die Dokumentation der Anwendungsfälle sowie die Ergebnisse der Unternehmensbefragungen wurden als Grundlage für die Anforderungsanalyse benutzt. Die Anforderungsanalyse wurde prinzipiell in drei Phasen unterteilt:

- Anforderungserfassung
  - Verstehen des Problems
- Anforderungsspezifikation
  - Beschreiben des Problems
- Anforderungvalidierung und –verifikation
  - Alle Beteiligten begutachten und verifizieren die detaillierte Spezifikation.

Die Erfassung wurde wie bereits erwähnt durch die Befragungen und Anwendungsfällen durchgeführt. Aus diesen grundlegenden Dokumenten wurde eine Liste mit allen abgeleiteten Anforderungen aufgestellt. Im nächsten Schritt, der Anforderungsspezifikation wurden diese Anforderungen in mehreren Schritten bearbeitet. Zunächst einmal wurden natürlichsprachliche Ausdrücke entfernt, bzw. verallgemeinert um die Aussagen auch für nicht Experten verständlich zu machen. Inkonsistenzen innerhalb der Anforderungen wurden entfernt. Dies bedeutet auch, dass die Anforderungen immer eindeutig sein müssen. Durch eine spezielle Notifikation wurde darauf geachtet, dass die Anforderungen und deren Änderungen nachvollziehbar und belegbar sind.



**Bild 4:** Architektur des zu entwickelnden PRIME Systems

Das Resultat dieser Anforderungsanalyse ist eine Anforderungsmatrix. In dieser Matrix werden die Anforderungen im Wesentlichen verschiedenen Wissensmanagementfunktionen bzw. –funktionsgruppen zugeordnet. Des Weiteren wurden noch Relationen zwischen einzelnen Domänen und den Anforderungen hergestellt. Domänen in diesem Sinne sind zum Beispiel Wissensmanagement, Organisation, Extended Enterprise, Mensch-Computer Schnittstelle, Technologie. Dieser wesentliche Zusammenhang wird im Folgenden dazu benötigt werden das PRIME System modular aufbauen zu können.

Die bisher beschriebenen Ergebnisse stammen alle aus dem AP1: Anforderungsanalyse des Projektes und sind im ersten Halbjahr erzielt worden. Alle öffentlichen Ergebnisse sind unter /3/ im Detail einzusehen.

Im nächsten Schritt des Projektes werden in der Implementierungsphase diese Ergebnisse als Input für die Entwicklung der PRIME Methodik sowie eines ersten Softwareprototypen eingesetzt. **Bild 4** zeigt eine mögliche Architektur des PRIME Systems. Die Software ist ein 3-Schichten Architektur. In der Interface-Schicht werden dem Benutzer personalisierte Schnittstellen zur Verfügung gestellt. Diese sind weitestgehend universell auf vielen mobilen Systemen einsetzbar. Die Business-Schicht enthält einen Validation-Manager, der die Authentifizierung des Benutzers und somit die Personalisierung der Schnittstelle ermöglicht. Dieser kommuniziert somit mit der Benutzerdatenbank in der Datenschicht und der Interface Anwendung. Über einen Communicator wird das Wissen erfasst und an die Wissensdatenbank weitergeleitet. In einem Parser werden diese Wissensdaten aufbereitet. Die

Integration Manager - Anwendung enthält Wissensmetamodelle und über externe Zugriffsmöglichkeiten kann das Wissen somit von Personen im Unternehmen gezielt geordnet, verwertet und geleitet werden, sowie die Zugriffe gesteuert werden.

Im AP4: Validierung und Verifikation wird das System erprobt und überprüft werden. Im abschliessenden AP5: Training und Evaluierung wird das System unter realen Umständen in den beteiligten Unternehmen eingebunden und eingesetzt werden.

Das gesamte Projekt wird natürlich von Projektmanagementaufgaben sowie Öffentlichkeitsarbeit begleitet.

#### 4 Zusammenfassung

Dieser Artikel hat kurz den aktuellen Status über den Einsatz von Wissensmanagementsystemen in der Industrie vorgestellt. Die Notwendigkeit einer industrienahen und praktikablen Lösung wurde unter anderem am Beispiel erläutert. Im dritten Abschnitt wurde darauf eingegangen, wie das europäische Forschungsprojekt PRIME eine Lösung für diese Problematik zu entwickeln sucht. Erste Ergebnisse des noch jungen Projektes im Bereich der Erfassung der industriellen Anforderungen wurden kurz vorgestellt. Im kommenden Jahr wird innerhalb des Projektes die Methodik sowie ein erster Prototyp des PRIME Systems entwickelt werden.

#### 5 Literatur

- /1/ Boley, H., Guarino, N.: Workshop on Product Knowledge Sharing for Integrated Enterprises, Proceedings of the First International Conference on Practical Aspects of Knowledge Management, Basel, 1996/1/
- /2/ Dietz, P., Penschke, S., Ort, A.: Strategies for Product Knowledge Management and Feedback to Design – Application Examples, IMW, 1997
- /3/ PRIME Konsortium,  
<http://www.prime-project.org>, 2002



## PDM/PLM – Verwaltung von Produktdaten ohne Grenzen !?

Goltz, M.; Müller, D.

*Während in der Produktionsplanung- und steuerung der Einsatz eines bereichsübergreifenden, rechnergestützten Werkzeugs zum Alltag gehört, beschränkt sich die Produktentwicklung auf spezialisierte Insellösungen, wie z. B. CAD, FEM. Ebenfalls üblich ist die Speicherung von Daten in unternehmensinternen File-Systemen, mit entsprechenden Problemen bei der Zugriffsverwaltung und der Suche nach bestimmten Informationen. Dabei wurde in den letzten Jahren ein leistungsfähiges Werkzeug namens PDM-System entwickelt, welches als Rückgrat und Integrationsplattform für eine Rechnerintegrierte Produktentwicklung dient. Ziel dieser Systeme ist die konsistente Verwaltung aller entwicklungsrelevanten Daten sowie die Koordinierung der zur Erstellung dieser Daten notwendigen Abläufe. Der folgende Artikel bietet eine kleine Einführung in das Thema PDM. Außerdem wird kurz der Einsatz eines solchen Systems in Forschung und Lehre am IMW dargestellt.*

*While production planning and control is using trans-sectoral computer integrated tools for their daily work, designers are still working with specialised isolated applications, e.g. CAD, FEM. In quite a lot of enterprises data is stored in internal file systems with the usual problems regarding access control or when looking for a certain information. On the other hand a powerful system called PDM has been developed during the last years, that is capable to serve as backbone and integrating platform for computer integrated product development. Its main focus is to ensure a consistent storage of all data relevant to the development process as well as the co-ordination of the processes to generate such data. The following article gives a short introduction into the PDM topic. Additionally, a short overview is given on research and teaching activities regarding such systems at the IMW.*

### 1 PDM im Konstruktionsprozess

#### 1.1 Der Wandel von EDM über PDM zu PLM

Was dem Produktionsplaner sein ERP-System ist, soll für den Konstrukteur das PDM/PLM-System

sein. Wohl kaum einer anderen CAx-Technologie ist es in den letzten Jahren so erfolgreich gelungen, durch immer neue Bezeichnungen Entscheidungsträger und Anwender über die eigentlichen Inhalte und Konzepte zu verwirren. Sprach man anfangs noch von EDM (Electronic Document Management oder auch Engineering Data Management) oder TDM (Technical Document Management), setzte sich eine Zeit lang der Begriff PDM (Product Data Management) durch. Doch mit zunehmender Zahl von Anbietern dieser Systeme und mit einer mittlerweile recht breiten Installationsbasis scheint der Zwang zuzunehmen, sich durch einen weiteren Begriff wie bspw. PLM (Product Lifecycle Management) oder cPDM (Collaborative Product Definition Management) vom Wettbewerber abzuheben. Betrachtet man jedoch die Entwicklung der letzten 20 Jahre auf diesem Gebiet, so stellt man fest, dass zwar alle Systeme mehr oder weniger das gleiche Ziel verfolgen, die Mittel und die konzeptionelle Ausrichtung sich doch erheblich unterscheiden. Letztendlich stellt man fest, dass die unterschiedlichen Bezeichnungen durchaus ihre Berechtigung haben, da sie die Evolution dieser Systeme widerspiegeln.

Die eigentliche Entwicklung begann bereits in den 1980er Jahren mit dem verstärkten Einsatz von CAD-Systemen. Um der Datenflut an erstellten Dateien Herr zu werden, waren Systeme gefragt, die eine effiziente Verwaltung der zahlreichen CAD-Modelle und Stücklisten ermöglichten. Zudem ergab sich durch den zunehmenden Einsatz weiterer CAx-Werkzeuge in der Produktentwicklung die Anforderung, jegliche digitalen Dokumente in einem einzigen Datenmanagement-Tool zu verwalten.

Dabei wurden zunächst zwei unterschiedliche Ansätze verfolgt. Auf der einen Seite boten die CAD Hersteller zusätzliche Zeichnungsverwaltungssysteme für ihr jeweiliges CAD-System an. Auf der anderen Seite mussten die Informationen über Bauteile und Baugruppen aus der Konstruktion mit den Informationen der Arbeitsvorbereitung konsistent gehalten werden. Aus diesem Grund wurden Zusatzmodule für ERP-

Systeme (Enterprise Resource Planning) entwickelt, die diese Informationen aus den jeweiligen CAD-Modellen extrahieren konnten. Dazu gehörten auch entsprechende Funktionen, diese Modelle über das ERP-System zu verwalten.

Immer komplexere Produkte sowie die Einführung von Simultaneous und Concurrent Engineering führten schließlich dazu, dass ein reines Datenverwaltungswerkzeug den Anforderungen nicht mehr gerecht wurde. Neben der Zugriffsverwaltung auf die Daten wurden Funktionen notwendig, die den Arbeitsablauf DV-technisch unterstützen konnten. Dazu zählen sowohl Informationen über Freigabeabläufe als auch Workflow-Systeme, die eine automatische Verteilung von Informationen innerhalb der entstehenden interdisziplinären Teams unterstützen. Auf diese Weise entwickelte sich ein technisches Informationssystem für ein integriertes Daten- und Prozessmanagement – das PDM-System.

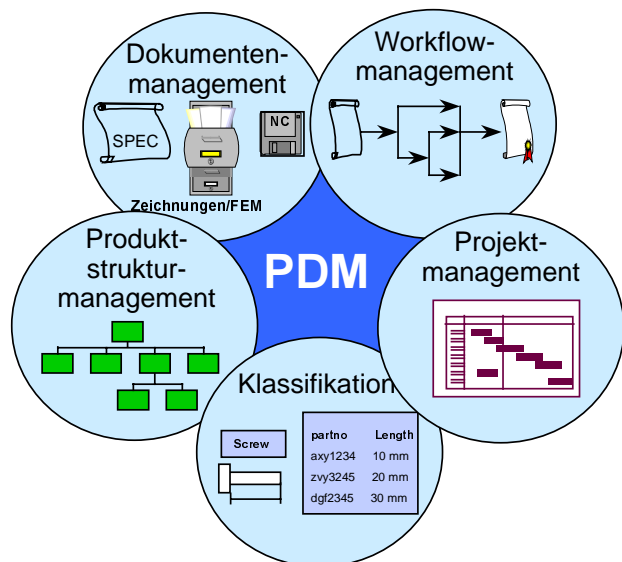
Mittlerweile gibt es zahlreiche Anbieter solcher Systeme sowie eine breite Installationsbasis der Grundfunktionen. Dies führt dazu, dass der Nutzen allgemein anerkannt ist und das Potenzial für weitere Integrationsbemühungen identifiziert wird. Hinzukommt, dass sich die Rolle des Ingenieurs immer mehr von den kreativen, gestalterischen Tätigkeiten zum Administrieren, Kommunizieren und Informieren verschiebt. Um ein qualitativ hochwertiges Produkt in möglichst kurzer Zeit auf den Markt zu bringen, werden immer mehr Entscheidungen aus dem Beschaffungs- und Produktionsprozess in die Konstruktion verlagert. Erweiterte Ansätze sehen in PDM ein Werkzeug zur Informationsbeschaffung und Entscheidungsunterstützung für den gesamten Produktlebenszyklus - angefangen bei der Anforderungsermittlung, über erste Entwürfe, die Ausarbeitung bis zum Konfigurationsmanagement und zur Instandhaltung bzw. zum Recycling. In Abgrenzung zum PDM-Begriff bezeichnet man diesen Ansatz als PLM – Product Lifecycle Management [2].

PLM wird nicht mehr nur als eine Technologie aufgefaßt, sondern es beschreibt einen strategischen Ansatz, komplexe Datenstrukturen und Geschäftsprozesse auch über Unternehmensgrenzen hinweg zu koordinieren. Es ist in diesem Zusammenhang mehr eine Sammlung von Methoden, die eine zusätzliche systemtechnische Unterstützung bieten. PLM hat

sich damit zum Rückgrat (Backbone) der IT-Landschaft im Produktentstehungsprozess eines Unternehmens entwickelt. Eine erfolgreiche Einführung solcher Systeme muss daher auch eine kritische Betrachtung der zu unterstützenden Geschäftsprozesse beinhalten. Dazu gehört die Definition von Nummernsystemen, Statusnetzwerken oder auch entsprechenden Workflows, die die Automatisierung der Geschäftsprozesse unterstützen.

## 1.2 Funktionen eines modernen PDM-Systems

Trotz unterschiedlicher Ansätze und Umsetzungskonzepte lassen sich für PDM-Systeme allgemein gültige Haupt- und Nebenfunktionen angeben. Bei den



**Bild 1:** Hauptfunktionen eines PDM-Systems

Hauptfunktionen handelt es sich um die vom Anwender aktiv benutzten Funktionen (siehe Bild 1), wie

- Produktstrukturmanagement,
- Dokumentenmanagement, inkl. Schnittstellen zu Fremdsystemen (CAD, ERP, ...),
- Klassifikation und Sachmerkmaleisten,
- Projektmanagement,
- Workflow- und Prozessmanagement, inkl. Freigabe- und Änderungswesen.

Die Nebenfunktionen werden durch die Systemarchitektur und die Administration des Systems zur Verfügung gestellt, ohne dass der Anwender direkten Zugang dazu hat. Zu den Nebenfunktionen zählen:

- Datentransport und -konvertierung, wie z. B. der Einsatz von Viewern oder Mark-up-Tools,
- Kommunikationsdienste wie Email, Online-Konferenzen oder Notification-Services, sowie
- die eigentliche Administration mit der Benutzerverwaltung, der Zugriffssteuerung, Archivierung und Backup sowie der Gewährleistung der Datensicherheit). /1, 3/

Die folgenden Abschnitte stellen die Hauptfunktionen eines PDM-System vor.

### 1.2.1 Produktstrukturmanagement

Ausgangspunkt der Produktmodellierung in einem PDM-System sind die Komponenten (Einzelteil, Baugruppe, Rohmaterialien, usw.) aus denen ein Produkt besteht. Informationen über diese Elemente werden in einem sogenannten Teilestammsatz (auch *Material* oder *Artikel* genannt) festgehalten. Alle weiteren Informationen (bspw. CAD-Modelle, Fertigungszeichnungen, etc.) werden diesem Teilestammsatz über verschiedene Beziehungen zugeordnet.

Die Beziehungen zwischen einzelnen Komponenten ergeben die Produktstruktur in einer hierarchischen Form. Durch eine Top-Down-Navigation der Strukturbeziehungen entsteht die Stückliste, die im PDM-System vorrangig die konstruktive Sicht auf das Produkt widerspiegelt. Möchte man dagegen wissen, in welche Baugruppen eine bestimmte Produktkomponente eingeht, erhält man durch eine Bottom-Up-Navigation den Verwendungsnachweis für das entsprechende Teil.

Prinzipiell beschreibt die Produktstruktur den vollständigen Aufbau eines Produktes aus seinen Einzelteilen. Allerdings werden in der Praxis drei unterschiedliche Arten von Stücklisten mit unterschiedlichem Informationsgehalt eingesetzt, die vom Stücklistengenerator aus den Strukturbeziehungen automatisch ermittelt werden können. Dabei handelt es sich um:

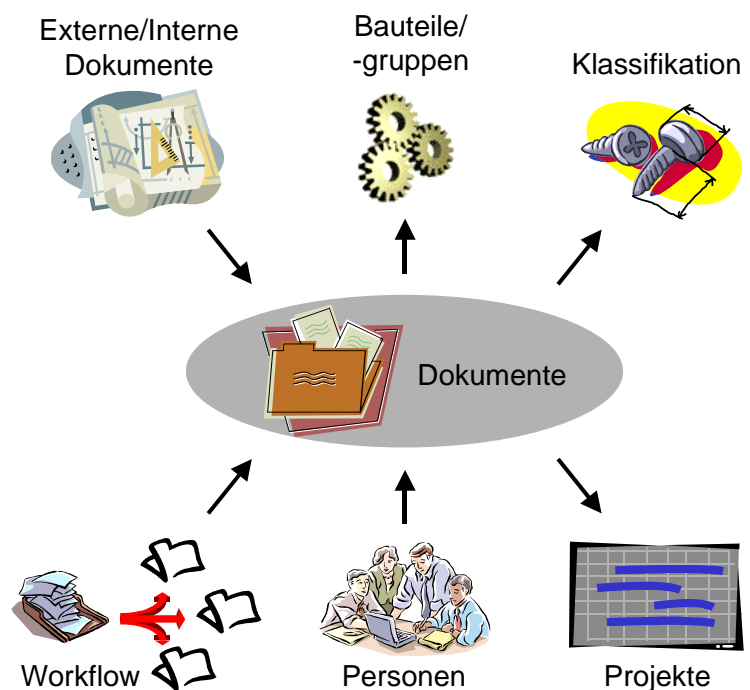
- *Baukastenstückliste* - enthält alle Komponenten auf der obersten Ebene einer Baugruppe; zur vollständigen Darstellung eines Produkts sind daher mehrere Stücklisten notwendig,

- *Strukturstückliste* - spiegelt die exakte Produktstruktur wider; allerdings können dadurch einzelne Komponenten mehrfach in der Struktur vorkommen,
- *Mengenübersichtsstückliste* - unstrukturierte Liste, die alle Positionen eines Teils zu einer Gesamtposition aufsummiert.

Ein weiterer Aspekt des Produktstrukturmanagements ist die Verwaltung unterschiedlicher Versionen einer Komponente. Eine neue Version einer Produktkomponente entsteht immer dann, wenn der, durch eine Freigabe eingefrorene Konstruktionsstand, verändert werden muss. Trotz der dann u. U. unterschiedlichen Versionsstände innerhalb einer Baugruppe oder eines Produkts, müssen die Strukturbeziehungen eindeutig zuordenbar sein. Dies geschieht i. Allg. durch die Angabe der Effektivität einer Version, also der Gültigkeit in einem bestimmten Zeitraum.

### 1.2.2 Dokumentenmanagement

Mithilfe des Dokumentenmanagements werden Daten verwaltet, die nicht direkt im PDM-System erzeugt wurden. Diese werden über einen so genannten Dokumentenstammsatz referenziert, der im Wesentlichen identifizierende, klassifizierende und beschreibende Informationen enthält. Dazu gehören u. a. auch Informationen über Zugriffsrechte und Beziehungen zu weiteren



**Bild 2:** Beziehungen von Dokumenten im PDM-System

Objekten im PDM-System. Bild 2 zeigt eine Übersicht der möglichen Beziehungen.

Die eigentlichen Dateien werden in einen geschützten Speicherbereich überführt. Man spricht dabei auch von einem Datentresor oder Sicherheitsbereich, da der Zugriff im Normalfall nur noch über das PDM-System erfolgen kann. Um ein Dokument bearbeiten zu können, muss es aus dem Sicherheitsbereich ausgecheckt werden. Dazu wird eine Kopie der Datei angelegt und gleichzeitig der Dokumentenstamm für weitere ändernde Zugriffe gesperrt. Dies verhindert, dass parallel Änderungen an unterschiedlichen Arbeitsplätzen durchgeführt werden können, die letztendlich zu Inkonsistenzen führen würden. Die überarbeiteten Dateien können als eine neue Version des Dokuments eingchecked werden, so dass der alte Bearbeitungsstand für Dokumentationszwecke erhalten bleibt. Zusätzlich hält eine Historie den ‚Lebenslauf‘ eines jeden Dokuments fest.

Obwohl externe Daten aus Fremdsystemen nicht direkt im PDM-System gespeichert werden, ist es in einigen Fällen notwendig, zumindest einen Teil der Informationen in das PDM-System zu übernehmen, wie z. B. Strukturzusammenhänge einer Baugruppe aus einem CAD-System. Ebenso ist es wünschenswert, Daten aus dem PDM-System an ein Fremdsystem zu übergeben, um z. B. den Kopf einer technischen Zeichnung auszufüllen. Dieses wird durch eine Kopplung oder auch Integration der verschiedenen Systeme auf Basis programmierbarer Schnittstellen (API – Application Programming Interface) erreicht. Die Realisierung kann in unterschiedlicher Tiefe und mit unterschiedlichem Komfort erfolgen:

- *Launching* – Der Dateityp ist im PDM-System mit der Zielanwendung verknüpft; nach dem Auschecken eines Dokuments ist somit ein automatischer Start möglich;
- *Kopplung* – Der Zugriff auf das Fremdsystem erfolgt über eine API, deren Funktionen beim Ein- und Auschecken der Datei aufgerufen werden (Ermittlung von Strukturinformationen beim Einchecken, Ausfüllen von Zeichnungsfeldern beim Auschecken);
- *Integration* – Bei dieser Form der Kopplung werden die notwendigen PDM-Funktionen in das Fremdsystem eingebettet, so dass der Anwender weiterhin in dem ihm vertrauten Erzeugersystem arbeitet, ohne jedoch auf die

Zusatzfunktionen des PDM-Systems verzichten zu müssen.

Letztlich ist bei einer Kopplung der Aufwand dem erwarteten Nutzen gegenüber zu stellen. Nicht immer ist eine tiefe Integration unbedingt notwendig oder realisierbar, weil das Erzeugersystem keine entsprechenden Funktionen über die API anbietet.

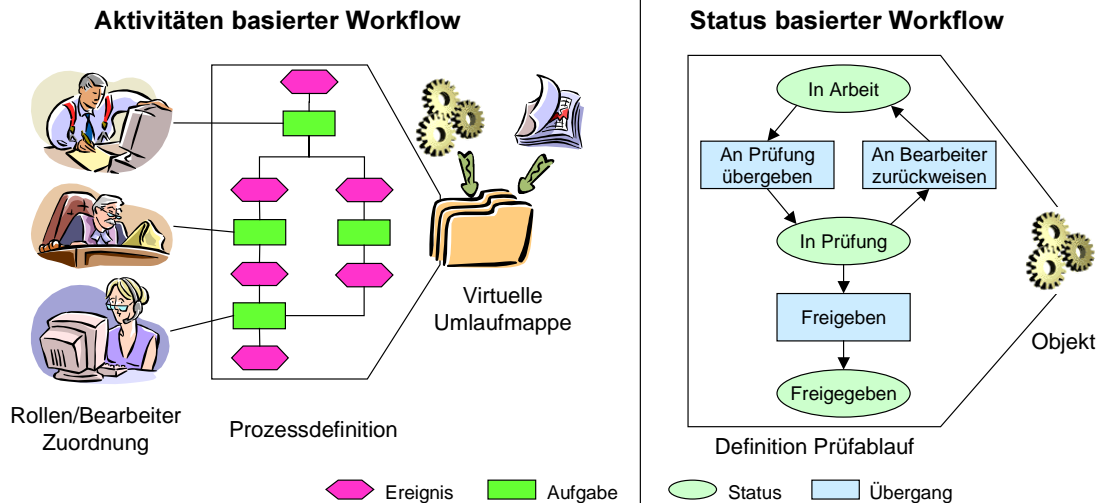
### 1.2.3 Klassifikation/Sachmerkmalelisten

Ein Problem der anwachsenden Datenflut ist das Auffinden bestimmter Informationen. Im Konstruktionsumfeld eines Unternehmens können sehr schnell mehrere 100.000 Dokumente und Teilestammsätze anfallen. Für den Anwender ist es in diesem Fall kaum möglich, ohne die Kenntnis der Dokumenten- oder Teilenummer die benötigten Informationen in einer akzeptablen Zeit aufzurufen.

Aus diesem Grund bieten Klassifizierungssysteme dem Anwender zusätzliche Attribute zur Gruppierung gleichartiger Objekte an. Dabei geht es nicht darum, den Stammdaten weitere Eigenschaftsfelder hinzuzufügen. Dieses würde einerseits zu einer nicht mehr handhabbaren Eingabemaske führen, andererseits können bei einem einzelnen Objekt viele Datenfelder nicht mit Werten belegt werden (z. B. hat nicht jedes Bauteil einen Gewindedurchmesser als Eigenschaft). Ziel der Klassifikation ist es daher, Objekte mit ähnlichen Eigenschaften zu gruppieren und diese Gruppen durch geeignete Attribute von anderen Gruppen unterscheidbar zu machen. Bspw. kann es eine Gruppe von Lagern geben, die durch Art und Innendurchmesser beschrieben wird, und eine weitere Gruppe von Schrauben, die durch die Gewindeform, -durchmesser und -länge beschrieben wird. Beiden Gruppen werden dann die entsprechenden Teilestämme von Lagern und Schrauben zugeordnet. Mit der Zuordnung erfolgt eine Merkmalsbewertung, die es später ermöglicht, Objekte über die Angabe bestimmter Attributwerte zu suchen, z. B. alle Schrauben mit einem Gewindedurchmesser von 10 mm.

### 1.2.4 Workflowmanagement und Freigabe- und Änderungsabläufe

Bei den bisher beschriebenen Funktionen handelt es sich im Wesentlichen um eine passive Verwaltung der Arbeitsergebnisse der Produktentwicklung. Um jedoch die Erstellung dieser Ergebnisse aktiv zu steuern, verfügen PDM-



**Bild 3:** Gegenüberstellung des ‚Aktivitäten basierten‘ und des ‚Status basierten‘ Workflows

Systeme über ein Prozessmanagement, welches sich in Prüfabläufe und Workflows unterteilen lässt (siehe Bild 3).

Prüfabläufe definieren die für ein Objekt zulässigen Zustände (den jeweiligen Status eines Objekts) und legen die erlaubten Übergänge zwischen diesen fest. Man spricht hierbei auch von ‚Status basierten Workflows‘. Die Angabe zusätzlicher Funktionen als Vor- oder Nach-Aktion ermöglicht das Ausführen weiterer Aktivitäten, die vom System gesteuert werden (z. B. Informationsverteilung, dass ein bestimmter Status erreicht wurde).

Während bei Prüfabläufen der Status eines Objekts im Mittelpunkt steht, der über einen längeren Zeitraum stabil sein kann (z. B. ‚freigegeben‘), geht es bei ‚Aktivitäten basierten Workflows‘ um aktuelle Aufgaben, die möglichst schnell zu erledigen sind. In der Definitionsphase wird die Abfolge der Aufgaben festgelegt. Zusätzlich werden die potentiellen Bearbeiter über ein Rollenmodell zugeordnet und die zu bearbeitenden Objekttypen bestimmt. Zur Laufzeit werden dann die betroffenen Objekte in der vorgegebenen Reihenfolge an die Personen geschickt, die die vordefinierten Rollen innehaben. Die Rückmeldung erfolgt in den meisten Fällen über das Fertigmelden der Aufgabe durch den Bearbeiter. Jede Workflow-Definition kann mehrfach für unterschiedliche Objekte gestartet werden. Dagegen spricht man von Ad-hoc-Workflows, wenn es sich um einen einmaligen Ablauf handelt, bei dem Definition und Laufzeit direkt aufeinander folgen.

Das Änderungswesen ist in jedem Unternehmen ein wiederkehrender und häufig unvermeidbarer Prozess, der viele Bereiche des Unternehmens

betrifft. Dabei geht es meistens um Änderungen an Objekten, die bereits freigegeben wurden, so dass nachgelagerte Bereiche mit dem Informationsstand arbeiten können. Zur Verwaltung aller mit einer Änderung zusammenhängenden Informationen, verfügen die meisten PDM-Systeme über zwei spezielle Objekttypen – den Änderungsantrag und den Änderungsauftrag. Mithilfe des Änderungsantrags werden Wünsche und Anregungen für Veränderungen gesammelt. Diese müssen hinsichtlich Dringlichkeit (‚Produktionsausfall?‘ oder ‚neue Funktion für nächste Produktgeneration?‘) und Realisierbarkeit bewertet werden. Um eine Änderung durchzuführen, wird ein Änderungsauftrag erstellt, dem die betroffenen Objekte zugeordnet werden. Außerdem lassen sich so mehrere Anträge zu einem Änderungsauftrag zusammenfassen. Die Beurteilung von Anträgen und die Bearbeitung von Änderungsaufträgen lässt sich durch einen standardisierten Workflow unterstützen.

### 1.2.5 Projektmanagement

Durch die umfangreichen Daten und Informationen, die in einem PDM/PLM-System enthalten sind, bietet sich eine Integration des Projektmanagements in das System an. Das Ausnutzen der vorhandenen Funktionalität des Systems sollte sich dabei nicht nur auf die einfache Terminplanung beschränken, sondern auch Aspekte der Aufgabenplanung, -steuerung und -überwachung einschließen. Die Art eines Projekts kann vielfältig ausgeprägt sein, wie z. B. als Auftrags-, Änderungs- oder Entwicklungsprojekt.



Im einfachsten Fall stellt ein Projekt eine virtuelle Sammelmappe dar, der alle vorhandenen Daten, Informationen und Ergebnisse zugeordnet werden, die mit dem Projekt verbunden sind. Zu diesen Daten zählen u. a. Bauteilinformationen, Dokumente, projektspezifische Konfigurationsdaten, Personalinformationen, Kundendaten und Angebots- oder Vertragsspezifikationen. Durch die logische Verknüpfung der Daten miteinander wird ein digitales Produktmodell definiert. Dies ermöglicht eine ablauforientierte Strukturierung der über den gesamten Produktlebenszyklus anfallenden oder benötigten Daten, wodurch eine Zuordnung zu einzelnen Teilaufgaben unterstützt wird. Die Strukturierung der Projekte ermöglicht eine Gliederung in einzelne Teilprojekte, mit einer entsprechenden Zuordnung zu Aufgaben oder Teams. Die Zuweisung von Dokumenten und Artikeln zu diesen Teilprojekten ist dabei sehr flexibel.

Neben der einfachen Verwaltung von Projektstrukturen ermöglicht das erweiterte Projektmanagement die globale Steuerung und Kontrolle eines entsprechend definierten Entwicklungsvorhabens. Basierend auf dem Prozessmanagement übernimmt es u. a. die Regelung der Kapazitäten, Kosten und Termine. Dadurch erreicht man eine Zusammenführung von Produkt- und Prozessdaten. Somit ist es jederzeit möglich, einen Überblick über den Ist-Zustand eines Projektes in Bezug auf Planung, Fortschritt oder Realisierung zu erhalten.

### 1.3 Customizing eines PDM-Systems

Die Einführung eines PDM-Systems erfordert einerseits eine gute organisatorische Vorbereitung hinsichtlich der verwendeten Funktionen, und andererseits einen daraus resultierenden Implementierungsaufwand, um das System an die Bedürfnisse des Unternehmens anzupassen. Dieser Prozess wird häufig auch Customizing genannt und unterteilt sich in die Systemkonfiguration und die

Entwicklung neuer oder erweiterter Funktionen.

Bei der Systemkonfiguration geht es darum, die Grundfunktionen durch Auswahl vorhandener Optionen an unternehmensinterne Standards anzupassen, wie z. B.:

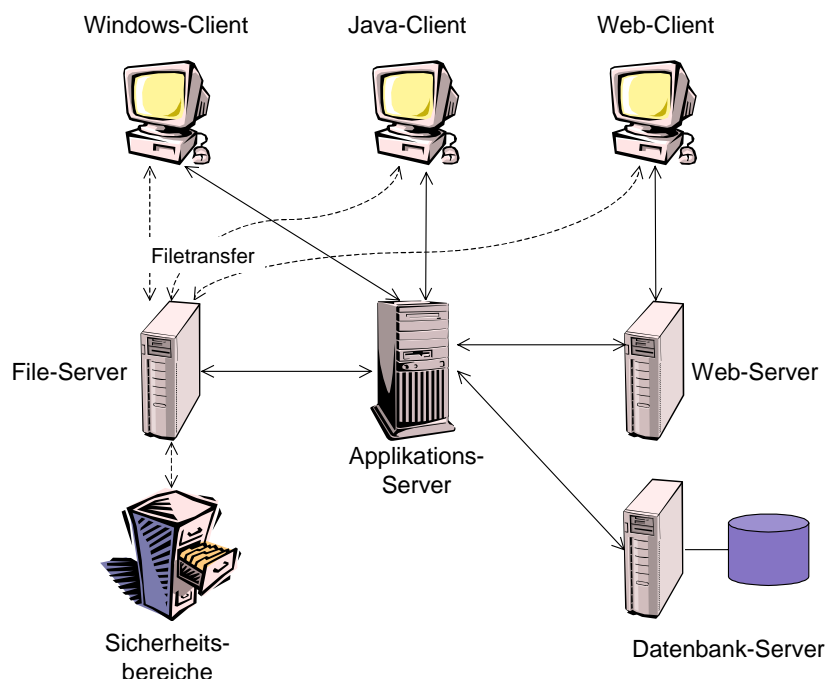
- Nummernkreise,
- Statusdefinitionen und Prüfabläufe, oder
- Workflow- und Rollen-Definitionen.

Lassen sich die Anforderungen bezüglich der zu unterstützenden Geschäftsprozesse nicht über die Standardfunktionalität abdecken, bieten die meisten PDM-Systeme entsprechende Entwicklungswerkzeuge zur Erweiterung vorhandener Funktionen und zur Erstellung neuer Module an. Dazu zählen:

- Datenbanktools zur Modifikation des Datenmodells,
- grafische Tools zur Definition der Benutzeroberfläche,
- Programmierumgebung zur Erstellung von Skripten, die bspw. über Button- oder Maskenereignisse automatisch ablaufen können.

### 1.4 Architektur

Die heterogene Systemlandschaft in der Produktentwicklung erfordert eine offene, flexible Systemarchitektur, die möglichst in der Lage ist,



**Bild 4:** Client-Server-Architektur eines PDM-Systems

plattformunabhängig Software in einem beliebigen Rechnernetzwerk bereitzustellen und Daten zu verteilen. Aus diesem Grund sind die meisten PDM-Systeme als Client-Server-System konzipiert. Dabei wird die Anwendungs- und Datenbanklogik auf einem (oder mehreren) Server(n) zur Verfügung gestellt. Auf der Client-Seite befindet sich dagegen nur die plattformspezifische Präsentationslogik, die als Schnittstelle zur Interaktion mit dem Benutzer fungiert. Der prinzipielle Aufbau ist in Bild 4 dargestellt.

Ein weiterer wesentlicher Bestandteil der PDM-Architektur ist das so genannte Repository. Dieses beinhaltet alle Informationen über das Datenbankschema (die verwalteten Objekte und deren Beziehungen untereinander) und die vorhandenen Methoden, mit denen Daten angelegt, abgefragt, verändert und gelöscht werden können. Häufig werden in einem Datenbankgestützten Repository auch Informationen über den Bildschirmaufbau des PDM-Clients abgelegt, die dann von der plattformspezifischen Präsentationssoftware aufbereitet werden müssen. Somit lassen sich z. B. einmal definierte Strukturen in einem Windows-Client, einer Webanwendung oder einem Java-Client ohne zusätzlichen Anpassungsaufwand nutzen.

## **2 PDM am IMW**

Das Institut für Maschinenwesen setzt schon seit längerer Zeit PDM-Software der Firma Eigner ein. Initiiert wurde dieses durch das europäische Forschungsprojekt SIMNET vor ca. 4 Jahren. Die damalige Version firmierte noch unter dem Namen CADIM/EDB. Die Entwicklung der Funktionalität für das SIMNET Projekt erfolgte in der Folgeversion axalant™. Die neueste Version ‚Eigner PLM 5.0‘ mit einem erweiterten Funktionsumfang zur Unterstützung des Lifecycle Managements ist gerade auf den Markt gekommen. Das Upgrade ist noch in diesem Jahr vorgesehen.

Die derzeitige axalant™ Installation am IMW befindet sich auf einem Microsoft Windows® 2000 Server, der gleichzeitig als Datenbank-Server mit einer Oracle8i Installation dient. Des Weiteren kommt der zum PDM-System gehörende Tcl/Tk-Web-Server zum Einsatz, der einen Zugriff auf das System über einen Webbrowser ermöglicht. Für die nähere Zukunft ist zudem eine Systemerweiterung zur Integration einer CAD-Schnittstelle zu Catia V5 geplant.

## **2.1 Das CIM II Praktikum**

Mit dem Wintersemester 2002/2003 wird auch das CIM II Praktikum von SAP R/3 auf axalant™ umgestellt, um dem Schwerpunkt der Rechnerintegrierten Produktentwicklung besser gerecht zu werden. Zudem wird damit auch der aktuellen Entwicklung Rechnung getragen, das in immer mehr Betrieben Hochschulabsolventen PDM-Systeme in der täglichen Arbeit vorfinden. Vor dem Hintergrund heutiger verteilter, web-basierter Konstruktionsprozesse soll außerdem das prozessorientierte Verständnis gefördert werden.

Der Inhalt des Praktikums umfasst eine allgemeine Vorstellung der modernen DV-Unterstützung im Umfeld der Produktentwicklung, speziell in der Konstruktion. Dabei wird besonders auf die Vorstellung der grundlegenden und erweiterten Methoden und Funktionen eines PDM/PLM-Systems eingegangen. Praktische Übungen zu Standardabläufen werden an praxisnahen Beispielen in Projektteams durchgeführt, um den Studierenden einen möglichst realitätsnahen Einblick zu gewähren.

In einer späteren Ausbaustufe ist die Zusammenarbeit mit anderen Hochschulen geplant, so dass Studierende in gemeinsamen Praktika einen Einblick in die Probleme der verteilten Produktentwicklung erhalten. Die web-basierte Kommunikation soll eine realitätsnahe Simulation von verteilten Entwicklungsteams ermöglichen.

Als spätere Erweiterung des Praktikums ist außerdem eine Einführung in das Customizing (vgl. Kap. 1.3) vorgesehen. Die Anpassung des Verhaltens und Erscheinungsbilds eines PDM/PLM-Systems an die vorhandenen Gegebenheiten vor Ort ist zur effektiven Einführung und Leistungsoptimierung von großer Bedeutung. Somit erhalten die Studierenden einen Einblick in die Variabilität und Anpassungsfähigkeit eines Systems.

## **2.2 Forschung im PDM-Umfeld**

### **2.2.1 Rückblick**

Das IMW ist seit vielen Jahren auf dem Gebiet der Rechnerintegrierten Produktentwicklung in der Forschung aktiv, angefangen von Datenmodellen für ein integriertes Produktmodell, über das Anforderungsmanagement bis zum Thema des Engineering Workflow. Dabei wurden in

verschiedenen Forschungsvorhaben Zusatzmodule für PDM-Systeme entwickelt, die eine integrierte und prozessorientierte Vorgehensweise in der Produktentwicklung unterstützen.

Das Thema Workflowmanagement wurde das erste Mal im Rahmen des EU-Projekts CONFLOW<sup>1</sup> aufgegriffen. Dabei ging es darum, bei Änderungen an Produktkomponenten mithilfe einer Prozessbibliothek einen Änderungsworkflow so zu definieren, dass automatisch die richtigen Leute in der richtigen Reihenfolge informiert und in die Entscheidungsfindung einbezogen werden. Dazu mussten über verschiedene Analysetools auch die Abhängigkeiten innerhalb der Produktstruktur berücksichtigt werden.

Diese Untersuchungen führten im darauf folgenden SIMNET-Projekt<sup>2</sup> zu einem völlig neuartigen Ansatz: dem ‚Parameterbasierten Engineering Workflow‘. Grundlage dabei sind konstruktive Parameter (wie z. B. Länge, Kraft, Zugfestigkeit), die einerseits Beziehungen zwischen Produktkomponenten definieren, andererseits aber auch als Kommunikationsplattform in einem unternehmensübergreifenden Entwicklungsprozess dienen. Bei Änderungen lassen sich über Verknüpfungen zu Bauteilen sofort die Auswirkungen erkennen, und über eine Zuordnung von Personen zu Parametern automatisch die betroffenen Bearbeiter informieren.

Ein methodischer Ansatz für unterstützte Verwaltung/Organisation von Produkthanforderungen für komplexe Produkte wurde im Projekt KARE<sup>3</sup> entwickelt, eine in PDM-Systemen erst seit kurzem berücksichtigte Funktionalität. Ausgangspunkt des Prozesses ist die Übernahme von Einzelanforderungen in das PDM-System bzw. deren Spezifizierung kombiniert mit den strukturellen Zusammenhängen. Das PDM-System ermöglicht die Verwaltung, Bearbeitung und Strukturierung der Anforderungen, um eine konsistente und eindeutige Produktdefinition zu erreichen. Auf dieser Basis wird eine optimierte Hersteller-Kunde-Beziehung zur schnelleren und verbesserten Angebotserstellung ermöglicht.

## 2.2.2 Zukünftige Forschungsschwerpunkte

Die Forschung auf dem Gebiet PDM/PLM soll auch zukünftig ein Schwerpunkt am IMW sein. Gegenwärtige Aktivitäten sind bspw. die Beteiligung an der Interessenbekundung (Eol) ‚NeSED – Neutral System Engineering Database using AP 233‘<sup>4</sup>. Dabei geht es u. a. um den Aspekt der PDM-Integration in die Domäne des Systems Engineering basierend auf einer STEP AP233 Schnittstelle. In der beabsichtigten Asien-Kooperation ‚EAPSTRA – EurAsian Network for Product Lifecycle Support and Training‘ sollen moderne PLM-Technologien zur Unterstützung des Produkt Lebenszyklus den asiatischen Partnern nähergebracht werden.

Weitere interessante Fragestellungen für potentielle neue Forschungsprojekte finden sich auf folgenden Gebieten:

- Integriertes Anforderungsmanagement
  - Mapping von Anforderungen auf Lösungsobjekte
  - Anforderungsverfolgung
  - Lösungsfindung/-bewertung
- Engineering Workflow auf Basis eines objektorientierten Produktmodells
  - Produktdatengesteuertes Workflowmanagement
  - Unternehmensübergreifendes Workflow-Management
- Unternehmensübergreifende Entwicklungsnetzwerke
  - Gemeinsame projektbezogene Datenbasis
  - Kontrollierter Zugriff auf verfügbare Informationen
  - Wieder- und Weiterverwendung von Daten
  - Schnittstellen/Agenten
  - Berücksichtigung des Human Factor
  - Begriffsmapping
  - Kommunikationssynchronisation

## 3 Fazit

Der vorliegende Artikel beschäftigte sich mit der Entwicklung und den Hauptfunktionen eines PDM-Systems. Dieses soll einerseits Einsteigern die Möglichkeit geben, sich in komprimierter Form in das Thema einzulesen, und so hoffentlich anfängliche Berührungängste hinsichtlich des Zusatzaufwands und des erwarteten Nutzens

<sup>1</sup> Concurrent Engineering Workflow (INCO-960243); <http://www.imw.tu-clausthal.de/conflow>

<sup>2</sup> Workflow Management for Simultaneous Engineering Networks (EP-26780); <http://www.imw.tu-clausthal.de/simnet>

<sup>3</sup> Knowledge Acquisition and sharing for Requirement Engineering (EP 28916); <http://www.kare.org>

<sup>4</sup> [http://eoi.cordis.lu/dsp\\_details.cfm?ID=36203](http://eoi.cordis.lu/dsp_details.cfm?ID=36203)



mindern. Andererseits sind erfahrene Leser gern eingeladen, sich aktiv an den weiteren Aktivitäten des IMW im PDM-Umfeld zu beteiligen.

#### **4 Literatur**

- /1/ Schöttner, J.: Produktdatenmanagement in der Fertigungsindustrie : Prinzip, Konzepte, Strategien: München [u. a.]: Hanser, 1999
- /2/ Eigner, M. ; Roth, P.: Product Definition and Commerce als erweiterter PDM-Ansatz, Teil I. In: CAD-CAM Report, Nr. 12/2001, S. 50 ff.
- /3/ Eigner, M. ; Stelzer, R.: Produktdatenmanagement-Systeme : ein Leitfaden für Product Development und Life Cycle Management: Berlin [u. a.]: Springer, 2001

# Drehzahlprüfung von Cycloid-Getrieben

Birkholz, H.

*Cycloidgetriebe bieten analog zum Planetengetriebe die Möglichkeit, durch Einspeisen einer Steuerdrehzahl unterschiedliche Drehzahlen an den Getriebeausgängen zuzulassen. Im Institut für Maschinenwesen wurden zwei Cycloid-Getriebe verschiedener Hersteller auf ihr Drehzahl- und Temperaturverhalten hin überprüft.*

*As well as a planetary gear cycloid gearboxes offer the opportunity to control the speed of the outgoing shafts by inducing a control speed. At the institut for mechanical engineering a lot of tests were done for two different gears in respect of temperatur and speed.*

Die Versorgung des Getriebes mit Schmiermittel wurde durch eine Lanze realisiert, welche durch die Hohlwelle des Spindelbocks direkt in die zentrale Hohlwelle des Getriebes führte. Das Schmiermittel wurde anschließend in einem Spritzschutzgehäuse aufgefangen. Die Schmierstoffversorgung erfolgte in einem geschlossenen Kreislauf.

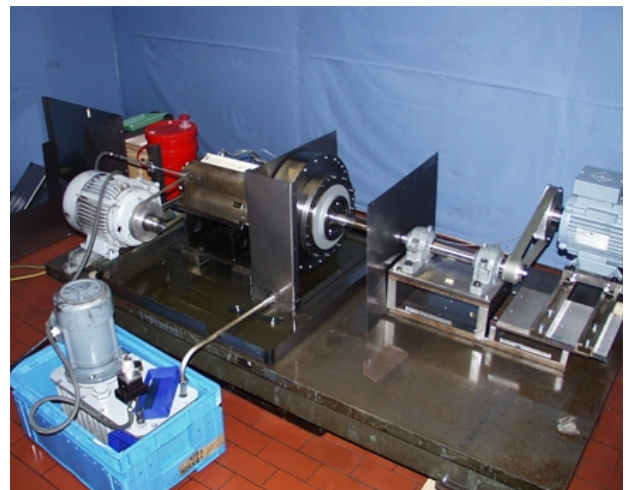
Der Prüfstands Aufbau ist in **Bild 2** dargestellt. Das Spritzschutzgehäuse ist geöffnet. In der Mitte befindet sich das eingebaute Cycloid-Getriebe. Im Vordergrund ist die Schmierstoffpumpe zu erkennen. In **Bild 3** ist die Anordnung der Temperaturmessstellen eingezeichnet.

## 1 Durchführung der Versuche

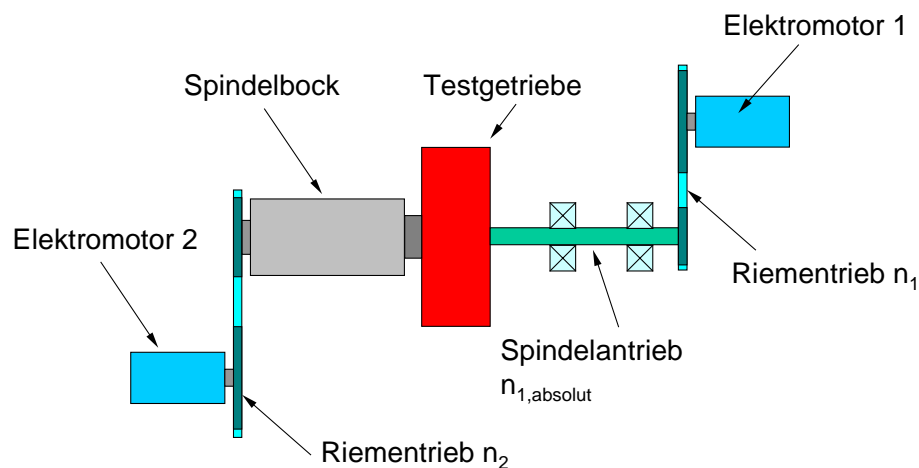
### 1.1 Prüfstands Aufbau

**Bild 1** zeigt die schematische Darstellung des Prüfaufbaus. Das Spritzschutzgehäuse ist nicht in der Darstellung enthalten.

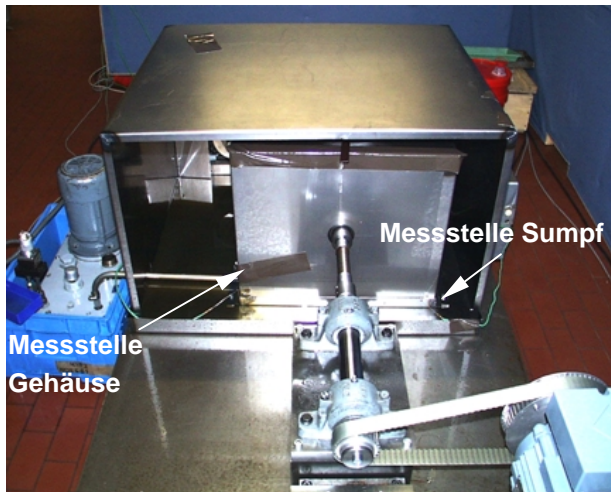
Das zu testende Cycloidgetriebe ist am Spindelbock angeflanscht. Als Antrieb  $n_2$  diente ein Riementrieb mit einem 5,5 kW-Elektromotor, der über einen Frequenzumrichter angesteuert wurde. Die Stelldrehzahl  $n_{1,absolut}$  wurde über einen zweiten Spindelaufbau und eine biegeeweiche Welle in das Getriebe eingebracht. Auch hier erfolgte die Drehzahleinstellung mittels eines Frequenzumrichters.



**Bild 2:** realisierter Prüfstands Aufbau mit geöffnetem Spritzschutzgehäuse



**Bild 1:** Schematische Darstellung des Prüfaufbaus



**Bild 3:** Anordnung der Temperaturmessstellen

Der Messfühler für die Sumpftemperatur wurde durch die Wandung in das Spritzschutzgehäuse geführt und direkt unter dem Getriebe angeordnet, so dass das aus dem Getriebe fließende Öl direkt auf den Messfühler auftraf. Der Messfühler für die Gehäusetemperatur wurde außen auf dem Spritzschutzgehäuse befestigt, da sich herausstellte, dass das umherspritzende Öl den gesamten Innenraum sehr gleichmäßig benetzte, also die Gehäusetemperatur der realen Öltemperatur ausreichend schnell folgte.

Schon bei geringen Drehzahlen kam es zum Austreten von Ölnebel aus der Behausung. Da sich der Ölnebel sehr fein im gesamten Prüfraum verteilte, war es notwendig, eine Zwangsentlüftung des Prüfraumes zu realisieren.

## 1.2 Drehzahlfestigkeit

Zunächst wurden Versuche zur Prüfung der Drehzahlfestigkeit gefahren werden.  $n_{1,relativ}$  bezeichnet dabei die Relativdrehzahl innerhalb des Getriebes,  $n_{1,absolut}$  die an der Zentralwelle einzustellende Drehzahl. Als Prüfmuster ergab sich die folgende Vorgehensweise:

1. Schritt:  $n_{1,absolut} = n_2$
2. Schritt:  $n_{1,relativ} = \text{Wert}$ ,  $n_2 = \text{const.}$
3. Schritt:  $n_{1,relativ} = -\text{Wert}$ ,  $n_2 = \text{const.}$
4. Schritt:  $n_{1,absolut} = n_2$

Die Haltezeit betrug je Drehzahlstellung 30 sec. Die einzustellenden Prüfdrehzahlen sind in **Tabelle 1** aufgeführt.

| Prüfdrehzahlen   |                            |                            |
|------------------|----------------------------|----------------------------|
| $n_2$<br>[U/min] | $n_{1,relativ}$<br>[U/min] | $n_{1,absolut}$<br>[U/min] |
| 500              | $\pm 2000$                 | +2500<br>-1500             |
| 1000             | $\pm 2000$                 | +3000<br>-1000             |
| 2000             | $\pm 2000$                 | +4000<br>0                 |
| 3000             | $\pm 2000$                 | +5000<br>+1000             |
| 3700             | $\pm 2000$                 | +5700<br>+1700             |

**Tabelle 1:** Prüfdrehzahlen der Cycloidgetriebe

## 1.3 Beharrungstemperaturversuche

Für die in **Tabelle 2** aufgeführten Werte wurden Dauerlaufversuche bis zur Einstellung einer Beharrungstemperatur durchgeführt.

| $n_2$<br>[U/min] | $n_{1,relativ}$<br>[U/min] | $n_{1,absolut}$<br>[U/min] |
|------------------|----------------------------|----------------------------|
| 500              | $\pm 1000$                 | +1500<br>-500              |
| 2000             | $\pm 1000$                 | +3000<br>+1000             |
| 3700             | $\pm 1000$                 | +4700<br>+2700             |

**Tabelle 2:** Drehzahlwerte zu Temperaturversuchen

Dabei wurde zunächst die positive Drehzahl für  $n_{1,relativ}$  angefahren, nach Erreichen der Beharrungstemperatur die negative Drehzahl. Die Messung der Temperatur war im Ölsumpf des Gehäuses, an der Gehäuseoberfläche sowie unmittelbar nach Erreichen der Beharrungstemperatur im Stillstand direkt auf der Getriebeoberfläche vorgesehen.

Die Weiterführung der Untersuchungen sollte ergebnisabhängig vorgenommen werden:

### bei Temperatureinfluss durch $n_2$ :

- gleiche Reihe für  $n_2$ ,  $n_1 = \pm 2000$  U/min

### ohne Temperatureinfluss durch $n_2$ :

- $n_2 = 2000$  U/min = const.,  $n_{1,relativ} = \pm 2000$ ,  $\pm 3000$ ,  $\pm 4000$  U/min.

## 1.4 Versuchsdurchführung

Nach Aufbau des jeweils zu testenden Getriebes wurden die geforderten Drehzahlen eingestellt und das Getriebe auf eine erste Drehzahlfestigkeit geprüft. Anschließend erfolgten die Versuche zur Beharrungstemperatur nach Tabelle , also mit

variabler Drehzahl  $n_2$  und konstanter Differenzdrehzahl  $n_{1,relativ}$ . Nach jedem Versuch wurde die Oberflächentemperatur des Getriebes gemessen. Zwischen jeder Temperaturstufe konnte das Getriebe komplett auf Raumtemperatur abkühlen. Da sich bei beiden Getrieben kein Einfluss der Drehzahl  $n_2$  nachweisen ließ, wurden anschließend Versuche bei konstanter Drehzahl  $n_2 = 2000$  U/min und veränderlicher Drehzahl  $n_{1,relativ}$  gefahren.

## 2 Auswertung

Es ist zu bemerken, dass bei allen Versuchen nach einer relativ gleichmäßigen Erwärmung bis zur Beharrungstemperatur nach Umkehr der Drehrichtung ein weiteres Ansteigen der Temperatur bis zu einer erneuten Beharrung auftrat. Die nachfolgende **Tabelle 3** zeigt Endtemperaturen und Beharrungszeiten für das kleinere Getriebe für die Versuche mit konstanter Relativedrehzahl  $n_{1,relativ} = \pm 1000$  U/min.

Der leichte Anstieg der Temperaturen bei den verschiedenen Drehzahlen  $n_2$  resultiert aus der Erwärmung der Lager im Spindelbock. Die Temperatur dieser Lager wurde ebenfalls überwacht und stieg naturgemäß mit steigender Drehzahl. Auffällig ist die deutliche Verminderung der Zeit bis zum Erreichen der Beharrungstemperatur.

| Drehzahl $n_2$ [U/min]                      | 500  | 2000 | 3700 |
|---|------|------|------|
| Beharrungstemperatur Gehäuseoberfläche [°C] | -    | 34   | 38   |
| Endtemperatur Getriebeoberfläche [°C]       | 39,1 | 42,0 | 44,1 |
| Zeit bis zur Beharrungstemperatur [min]     | 198  | 100  | 90   |

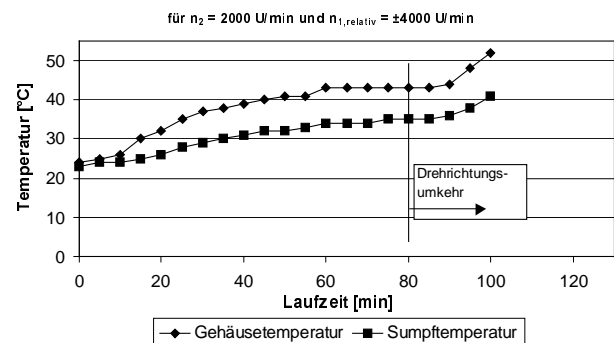
**Tabelle 3:** Endtemperaturen und Beharrungszeiten kleines Getriebe

Da sich kein signifikanter Einfluss der Drehzahl  $n_2$  auf die Erwärmung des Getriebes einstellte, wurde im Folgenden bei konstanter Drehzahl  $n_2 = 2000$  U/min die Spindeldrehzahl  $n_{1,absolut}$  variiert (**Tabelle 4**).

| Relativedrehzahl $n_{1,relativ}$ [U/min] | Spindeldrehzahl $n_{1,absolut}$ [U/min] |
|--|---|
| $\pm 2000$                               | 0<br>4000                               |
| $\pm 3000$                               | -1000<br>+5000                          |
| $\pm 4000$                               | -2000<br>+6000                          |

**Tabelle 4:** Drehzahlwerte für  $n_{1,relativ}$  und  $n_{1,absolut}$

Eine positive Drehzahl  $n_{1,absolut}$  bedeutet dabei gleiche Drehrichtung wie  $n_2$ , eine negative Drehzahl bedeutet entgegengesetzte Drehrichtung zu  $n_2$ . **Bild 4** zeigt den Verlauf der Temperatur für die letzte gefahrene Drehzahlstufe bis zum Abbruch.



**Bild 4:** Temperaturverlauf für  $n_2 = 2000$  U/min,  $n_{1,relativ} = \pm 4000$  U/min

Die erste Beharrungstemperatur stellte sich mit 43°C für  $n_2 = 2000$  U/min,  $n_{1,absolut} = -2000$  U/min nach 60 min ein. Die an der Oberfläche gemessene Getriebetemperatur betrug 59,1°C. Nach 80 Minuten erfolgte die Drehrichtungs-umkehr von  $n_{1,absolut} = -2000$  U/min auf  $n_{1,absolut} = +6000$  U/min. Nach ca. 5 Minuten kam es zu einem deutlichen Anstieg der Gehäusetemperatur und in der Folge zu einem Abfall der Drehzahl bis zum Abschalten des Antriebes. Die Getriebetemperatur betrug zum Zeitpunkt des Abschaltens 88,1°C. Nach einer Abkühlung auf Raumtemperatur wurde der zweite Versuchsteil mit  $n_{1,absolut} = +6000$  U/min wiederholt. Es zeigte sich das gleiche Ergebnis mit Drehzahlverringern und Abschalten des Antriebs nach ca. 15 min Laufzeit. Aus diesem Verhalten kann gefolgert werden, dass die Lagerung der Zentralwelle einer Drehzahl von 6000 U/min auf Dauer nicht standhält.

Die nachfolgende **Tabelle 5** zeigt Endtemperaturen und Beharrungszeiten für das große Getriebe für die Versuche mit konstanter Relativedrehzahl  $n_{1,relativ} = \pm 1000$  U/min.

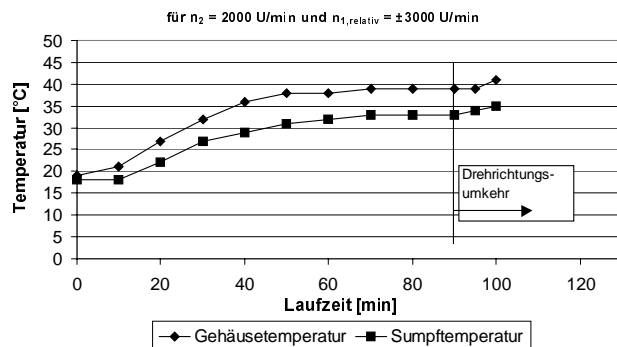
| Drehzahl $n_2$ [U/min]                      | 500  | 2000 | 3700 |
|---|------|------|------|
| Beharrungstemperatur Gehäuseoberfläche [°C] | 25   | 29   | 33   |
| Endtemperatur Getriebeoberfläche [°C]       | 30,5 | 34,8 | 41,2 |
| Zeit bis zur Beharrungstemperatur [min]     | 130  | 105  | 95   |

**Tabelle 5:** Endtemperaturen und Beharrungszeiten  
großes Getriebe

Auffallend war, dass wie auch bei den folgenden Versuchen innerhalb des Spritzschutzgehäuses eine wesentlich stärkere Ölbewegung zu beobachten war, obwohl die Schmiermittelmenge mit 250 ml/min konstant blieb. Dies ist auf den deutlich größeren Getriebeaußendurchmesser zurückzuführen.

Der leichte Anstieg der Temperaturen bei den verschiedenen Drehzahlen  $n_2$  resultiert auch hier aus der Erwärmung der Lager im Spindelbock. Auffällig ist ebenfalls die deutliche Verminderung der Zeit bis zum Erreichen der Beharrungstemperatur.

Da sich analog zum kleinen Getriebe kein signifikanter Einfluss der Drehzahl  $n_{2,absolut}$  einstellte, erfolgte die weitere Versuchsdurchführung bei konstanter Drehzahl  $n_2 = 2000$  U/min nach Tabelle 4. Für die letzte getestete Kombination  $n_2 = 2000$  U/min,  $n_{1,absolut} = -1000$  U/min stellte sich die Beharrungstemperatur von  $39^\circ\text{C}$  nach 70 min ein. Die Änderung auf  $n_{1,absolut} = +5000$  U/min brachte zunächst einen weiteren Anstieg der Temperatur, bis es zum Abschalten des Antriebs kam (**Bild 5**). Nach Beendigung des Versuches wurde auf der Getriebeoberfläche eine Temperatur von  $81,5^\circ\text{C}$  gemessen. Auch hier wurde aus Absicherungsgründen der Versuch wiederholt. Die Ergebnisse entsprachen dem ersten Versuch.

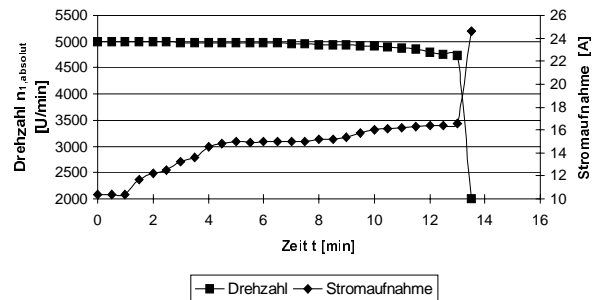


**Bild 5:** Temperaturverlauf für  $n_2 = 2000$  U/min,  
 $n_{1,relativ} = \pm 3000$  U/min, großes Getriebe

### 3 Messung von Drehzahl und Stromaufnahme

Um einen Eindruck von Drehzahlverhalten und Stromaufnahme während des Festgehens des großen Getriebes zu erhalten, wurden beide Größen zu identischen Zeitpunkten gemessen und im Diagramm (**Bild 6**) dargestellt.

Verlauf von Drehzahl und Stromaufnahme bis zum  
Abschalten



**Bild 6:** Drehzahl und Stromaufnahme bis zum  
Abschalten für  $n_2 = 2000$  U/min,  $n_{1,absolut} =$   
 $+5000$  U/min, großes Getriebe

Während der ersten Minute stellte sich ein Gleichgewicht zwischen Nenndrehzahl und Stromaufnahme ein. Nach Ablauf der ersten Minute kam es zu einem deutlichen Anstieg der Stromaufnahme bis zur vierten Minute bei gleichzeitig nur geringfügig sinkender Drehzahl. Anschließend hielten sich Drehzahlabfall und steigende Stromaufnahme die Waage, bis es nach ca. 13 Minuten zu einem schlagartigen Anstieg der Stromaufnahme bis zum Abschalten kam. Der letzte Punkt im Diagramm stellt den Endzustand zum Zeitpunkt des Abschaltens dar. Nach dem Abschalten wurde die Zentralwelle durch die Blockierung sofort auf die Drehzahl  $n_2$  beschleunigt, die Differenzdrehzahl  $n_{1,relativ}$  wurde also zu Null.

### 4 Zusammenfassung

Während der gesamten Versuche kam es bis auf die Ablösung des Typenschilds und das Auswandern der Dichtung an einem der Getriebe nicht zu Zerstörungen an den Getrieben. Beide Getriebe zeigten ein ähnliches Temperaturverhalten, Unterschiede dürften auf die mit einer Differenz von 40 kg unterschiedlichen Massen zurückzuführen sein. Beide Getriebe konnten die geforderten Drehzahlstufen nicht dauerhaft ertragen, das kleinere Getriebe blockierte bei  $n_2 = 2000$  U/min,  $n_{1,relativ} = +4000$  U/min, das große bereits eine Drehzahlstufe früher bei  $n_2 = 2000$  U/min,  $n_{1,relativ} = +3000$  U/min. Beide Getriebe konnten also nicht die nach Tabelle 4 geforderten Drehzahlstufen einhalten, zusätzlich ist zu berücksichtigen, dass eine Momentenbeanspruchung nicht stattfand.

## Geschwächte Welle-Nabe-Verbindungen auf dem Prüfstand

Birkholz, H.; Garzke, M.; Grünendick, T.; Schäfer, G.

*Aufgrund ihrer einfachen Montage und Fertigung und der Möglichkeit der konstruktiven Ankopplung an benachbarte Aggregate haben Welle-Nabe-Pressverbindungen eine herausragende Stellung und eine nachgewiesene hohe Akzeptanz im Maschinen- und Anlagebau erlangt. Konstruktiv bedingte Störungen stellen bezüglich der Übertragungsfähigkeit und der Haltbarkeit Schwachstellen dar.*

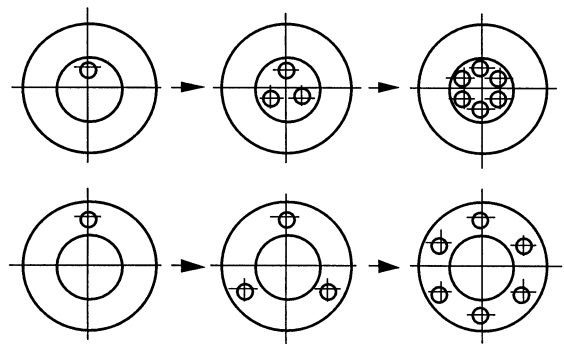
*Due to simple assembly and production and the possibility of the coupling to neighbouring aggregates shrink fits attained an outstanding position as well as a proven high acceptance in the machine and plant construction. Constructionally conditioned interferences represent weak points concerning the transmission and the durability.*

### 1 Einleitung

In der Antriebstechnik stellen Pressverbindungen bei der Übertragung hoher und wechselnder sowie umlaufender Kraftgrößen die am häufigsten eingesetzten Welle-Nabe-Verbindungen dar /1/. Vielfältige Veröffentlichungen zeugen von dem Bemühen, diese Verbindung noch leistungsfähiger zu gestalten und Schadensfälle durch eine gezielte Auslegung bereits im Konstruktionsstadium zu vermeiden. Die Berechnung des Übertragungsverhaltens und der Spannungen in Schrumpfvverbindungen und Kegelpressverbindungen für ungeschwächte Kreisquerschnitte von Welle und Nabe kann bei elastischer und teilplastischer Materialbeanspruchung als bekannt vorausgesetzt werden und wird durch experimentelle Untersuchungen zur Bestimmung des Dauerschwingfestigkeits-, Reibdauerbruch- und Verschleißverhaltens weiter abgerundet /2, 3, 4, 5/.

Dagegen mangelt es an Erkenntnissen bezüglich der Verbindungen, bei denen Radialbohrungen (z.B. bei Pressölverbänden) oder bei denen in Welle und Nabe exzentrische Axialbohrungen eingebracht werden (z.B. für Schmier- und Druckmittelzufuhr bei Kupplungen, Flanschbohrungen, Schraubenbefestigungen bei Spannringverbindungen usw.). Eine Auswahl derartiger geschwächter Welle-Nabe-Verbindungen stellt **Bild 1** schematisch dar. Die konstruktiv

bedingten Schwächungen beeinflussen das elastische Verhalten von Welle und Nabe zum Teil so stark, dass der für die Berechnung ungeschwächter rotationssymmetrischer Pressverbindungen zugrundeliegende ebene Spannungszustand als fragwürdig angesehen werden muss, zumal es in der Vergangenheit schon mehrfach zu Schäden an geschwächten Verbindungen gekommen ist /6/.



**Bild 1:** Übersicht über geschwächte Welle-Nabe-Verbindungen /6/

### 2 Übertragungsfähigkeit und durchschnittlicher Fugendruck

Die durch die Schwächung eintretende örtliche Veränderung des Fugendrucks muss bei der Berechnung der Übertragungsfähigkeit berücksichtigt werden, **Gleichung (1)**. Man kann zur Verwendung der Gleichungen der rotationssymmetrischen Verbindung einen durchschnittlichen Fugendruck bilden (**Gleichung (2)**), der aus dem Integralmittel über dem Umfang definiert wird. Der Fugendruck weist über der Bohrung bei  $\varphi=0^\circ$  einen Einbruch auf und stellt damit eine besondere Gefährdung bei Reibkorrosion dar /1/.

$$T = \int_0^{2\pi} p \cdot r_f^2 \cdot L \cdot \mu_{\text{betrieb}} \cdot d\varphi \quad (1)$$

$$\bar{p} = \frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \int_0^{2\pi} p \cdot d\varphi \quad (2)$$

## 2.1 Elastische Auslegung geschwächter Pressverbindungen

Die Verminderung des Fugendrucks infolge der Schwächung von Welle oder Nabe führt einerseits zu einer Spannungsüberhöhung im Bereich der eingebrachten Schwächungen und andererseits zu einer Reduzierung des übertragbaren Drehmoments. Zur Ermittlung der Beanspruchungen und Übertragungseigenschaften im elastischen Bereich sind umfangreiche Untersuchungen durchgeführt worden, deren Ergebnisse in Kennzahlendiagrammen dargestellt sind [6]. Im folgenden sollen die Ergebnisse an einigen charakteristischen Beispielen erläutert werden.

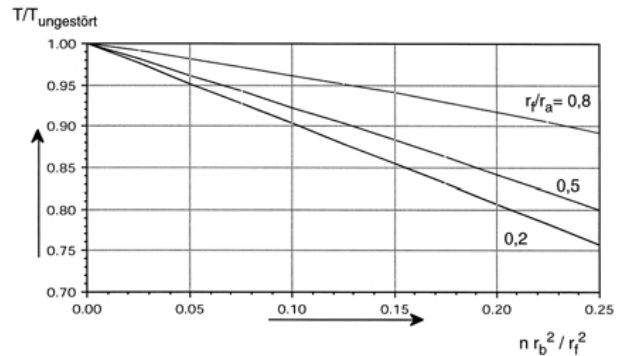
Grundlage der Vergleichsspannungsberechnung ist die Gestaltänderungsenergiehypothese. Zur Auslegung der geschwächten Verbindung auf Basis der rotationssymmetrischen Verbindung wird die maximale Spannung unter Einführung einer Formzahl  $\alpha_k$  berechnet, **Gleichung (3)**. Die Formzahl ist von der Geometrie der Verbindung und den Montagebedingungen abhängig. Für die Bestimmung der Übertragungsfähigkeit eines geschwächten Pressverbandes lässt sich die Übertragungsfähigkeitskennzahl  $\eta$  ableiten, **Gleichung (4)**.

$$\alpha_k = \frac{\sigma_{vmax}}{\sigma_{vungestört}} \quad (3)$$

$$\eta = \frac{T}{T_{ungestört}} = \frac{\int_0^{2\pi} p \cdot r_f^2 \cdot L \cdot \mu_{betrieb} \cdot d\varphi}{\int_0^{2\pi} q \cdot r_f^2 \cdot L \cdot \mu_{betrieb} \cdot d\varphi} = \frac{\bar{p}}{\bar{q}} \quad (4)$$

### 2.1.1 Welle mit Axialbohrungen

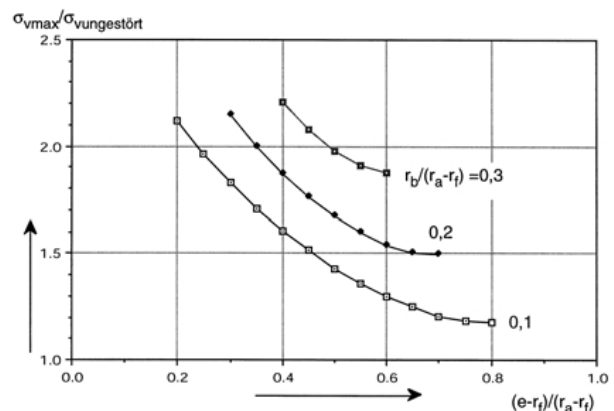
Zahlreiche Untersuchungen ergaben bei zutreffender Vereinfachung, dass der durchschnittliche Fugendruck  $p$  praktisch unabhängig von der Exzentrizität  $e$  und der Montagereibungszahl  $\mu_{montage}$  ist, er wird nur vom gesamten Bohrungsquerschnitt  $n\pi r_b^2$  beeinflusst, **Bild 2**. Die Anwendbarkeit findet dann eine Grenze, wenn die Restwandstärke einer Bohrung so klein ist, dass es zu plastischen Verformungen kommt.



**Bild 2:** Übertragungsfähigkeit für Wellen mit Axialbohrungen

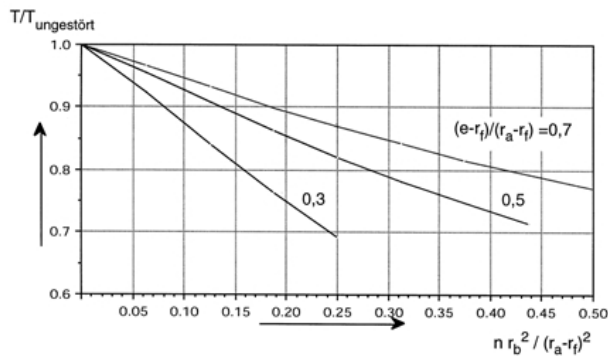
### 2.1.2 Nabe mit Axialbohrungen

Die an den Wellen mit Axialbohrungen gezeigten Zusammenhänge der Beanspruchungs- und Pressfugendruckverteilung lassen sich von den physikalischen Zusammenhängen her auch auf Naben mit Axialbohrungen übertragen, wobei der Montagezustand der geschwächten Naben eine weit geringere Rolle spielt als bei geschwächten Wellen. Die maximalen Bohrungsrandspannungen der durch Axialbohrungen geschwächten Nabe liegen immer an dem zur Fügefläche nächstliegenden Punkt des Bohrungsrandes. Näher zur Fügefläche liegende Bohrungen (geringere Exzentrizität  $e$ , **Bild 3**) sind stärker beansprucht; bei Vergrößerung des Bohrungsradius  $r_b$  nimmt die Formzahl  $\alpha_k$  zu. Die Untersuchungen zur Übertragungsfähigkeit zeigen, dass die Montagebedingung von untergeordnetem Einfluss ist. Die an den geschwächten Wellen dargestellten Zusammenhänge lassen sich grundsätzlich auf geschwächte Naben übertragen (**Bild 4**).



**Bild 3:** Formzahlen für Naben mit drei Axialbohrungen (ohne Rutschen);  $r_f/r_a = 0,5$

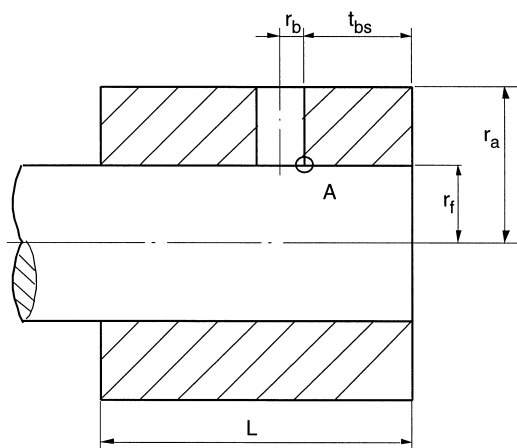




**Bild 4:** Übertragungsfähigkeit für Naben mit Axialbohrungen

### 2.1.3 Nabe mit Radialbohrungen

Die maximalen Bohrungsrandspannungen liegen immer bei dem zur Stirnfläche am nächsten liegenden Punkt des Bohrungsrandes an der Fügefläche (**Bild 5**, Punkt A). Ebenso wie bei Naben und Wellen mit Axialbohrungen spielt die minimale Wandstärke  $t_{bs}$  die entscheidende Rolle. Bohrungen nahe der Stirnfläche verursachen starke Spannungserhöhungen am Bohrungsrand.



**Bild 5:** Geometrische Bezeichnungen an Naben mit Radialbohrungen

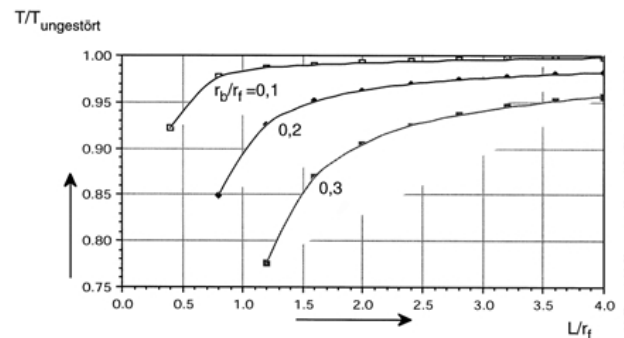
Bei der Übertragungsfähigkeit ist zu beachten, dass die auf der Fügefläche auftreffenden Bohrungen „Leerstellen“ darstellen, die bei der Berechnung der Übertragungsfähigkeitskennzahl  $\eta$  durch den Fugenleergrad  $\lambda_F$  berücksichtigt werden, **Gleichung (5)** und **Gleichung (6)**:

$$\eta = \frac{T}{T_{\text{ungestört}}} = \lambda_F \cdot \frac{\bar{p}}{q} \quad (5)$$

$$\lambda_F = \frac{2\pi \cdot r_F \cdot L - n\pi \cdot r_b^2}{2\pi \cdot r_F \cdot L} = 1 - \frac{n\pi \cdot r_b^2}{2\pi \cdot r_F \cdot L} \quad (6)$$

**Bild 6** zeigt die Übertragungsfähigkeit für Naben mit zwei Radialbohrungen. Die Untersuchungen

führen auch hier zu der Erkenntnis, dass der durchschnittliche Fugendruck  $p$  und das übertragbare Drehmoment  $T$  unabhängig von der Montage-bedingung sind.

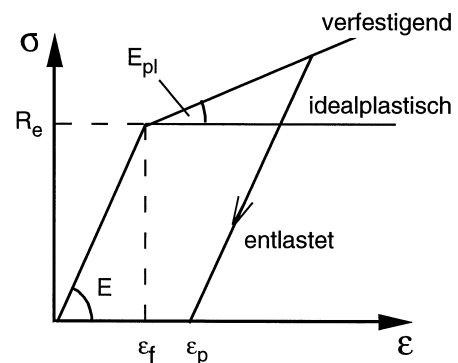


**Bild 6:** Übertragungsfähigkeit von Naben mit zwei Radialbohrungen

## 2.2 Teilplastische Auslegung geschwächter Pressverbindungen

Zur Steigerung der Übertragungsfähigkeit werden in vielen Fällen teilplastische Verformungen an Maschinenelementen zugelassen, ohne dass durch das Überschreiten der Elastizitätsgrenze mit einem sofortigem Ausfall der Verbindung gerechnet werden muss.

Zur Simulation der elastisch-plastischen Materialeigenschaften der Konstruktionswerkstoffe wird ein linear verfestigendes Verhalten nach **Bild 7** approximiert, für den der Extremfall  $E_{pl} = 0$  das elastisch-idealplastische Verhalten darstellt. Als Fließ-bedingung wird die Gestaltänderungsenergiehypothese gewählt.



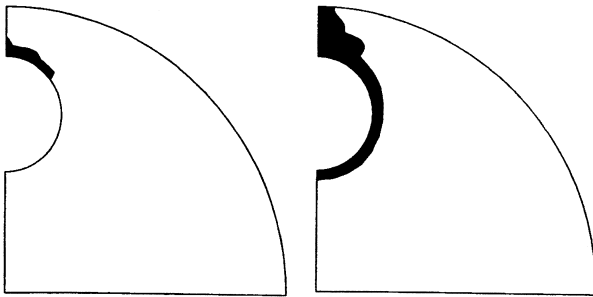
**Bild 7:** Spannungs-Dehnungs-Diagramm zur teilplastischen Auslegung geschwächter Pressverbindungen

Da teilplastische Probleme nichtlinear sind, sind die in **Abschnitt 2.1** vorausgesetzten Bedingungen für eine dimensionslose Darstellung der Ergebnisse nicht mehr gegeben. Für die teilplastische Auslegung kann jedoch näherungsweise eine dimensionslose Darstellung erreicht werden, wenn bei ausreichender Stützwirkung der verbleibenden

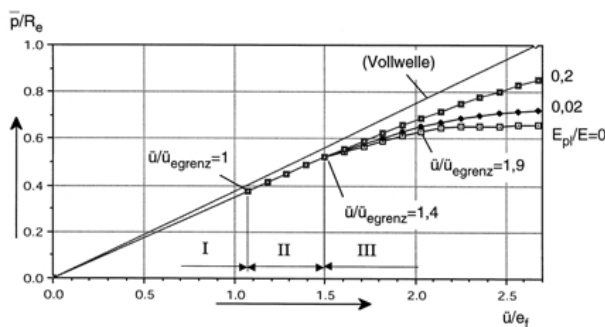


elastischen Gebiete die Verschiebungen und Verzerrungen der plastischen Zone die gleiche Größenordnung wie in der elastischen Zone aufweisen, die Untersuchungen beschränken sich daher auf kleine plastische Verformungen. **Bild 8** zeigt am Beispiel einer durch Axialbohrungen geschwächten Welle ohne Montagereibung die plastischen Zonen bei zunehmendem Übermaß. Die vom Bohrungsrand mit der höchsten Spannung ausgehende plastische Zone nimmt mit steigendem Übermaß zu und erreicht schließlich im Grenzfall die Fügefläche. Bei mehreren Bohrungen können sich auch die plastischen Zonen treffen.

Für das in Bild 8 abgebildete Beispiel zeigt **Bild 9** den auf die Streckgrenze bezogenen durchschnittlichen Fugendruck  $p$  in Abhängigkeit vom auf die elastische Grenzdehnung  $e_f$  bezogenen Übermaß  $\bar{u}$ .



**Bild 8:** Plastische Zonen einer Welle mit zwei Axialbohrungen ohne Montagereibung;  $r/b = 0,2$ ;  $e/r = 0,625$ ;  $Q_N = r/f/a = 0,5$ ; a)  $\bar{u}/\bar{u}_{\text{egrenz}} = 1,1$ ; b)  $\bar{u}/\bar{u}_{\text{egrenz}} = 1,4$



**Bild 9:** Fugendruck-Übermaß-Verhältnis einer Welle mit zwei Axialbohrungen ohne Montagereibung;  $r/b = 0,2$ ;  $e/r = 0,625$ ;  $Q_N = r/f/a = 0,5$

Solange die maximale Bohrungsrandspannung  $\sigma_{vmax}$  kleiner als die Streckgrenze  $R_e$  ist, wird die Welle rein elastisch beansprucht (Bereich I, Bild 9).

Wenn die maximale Bohrungsrandspannung  $\sigma_{vmax}$  die Streckgrenze  $R_e$  erreicht, wird die Welle rein elastisch am stärksten beansprucht. Der elastische

Grenzdruck  $p_{\text{egrenz}}$  und das elastische Grenzübermaß  $\bar{u}_{\text{egrenz}}$  werden erreicht.

Mit  $\sigma_{vmax}$  wird die Welle teilplastisch beansprucht. Solange die dünnste Stelle der Bohrungswand zwischen Bohrung und Fügefläche oder zwischen Nachbarbohrungen nicht vollplastisch beansprucht ist, weicht der durchschnittliche Fugendruck  $p$  nur „geringfügig“ von der Linearität zum Übermaß  $\bar{u}$  ab (Bereich II). Durch die Stützwirkung der verbleibenden elastischen Zone behält die plastische Dehnung  $e_{pl}$  am Bohrungsrand die gleiche Größenordnung wie die Dehnung an der Streckgrenze  $e_f$ . Im Vergleich zur rein elastischen Auslegung kann sich die Übertragungsfähigkeit in diesem Beispiel mit zulässigen plastischen Verformungen um 40% vergrößern.

Mit Erreichen der vollplastischen Durchverformung krümmen sich die Fugendruck-Übermaß-Linien stärker mit abnehmendem Verfestigungsersatzmodul  $E_{pl}$  (Bereich III).

### 3 Vergleich mit experimentellen Untersuchungen

Zur Untersuchung von Bauteilen und Maschinenelementen bei statischer und dynamischer Belastung sowie unter tribologischen Gesichtspunkten existieren am Institut für Maschinenwesen zahlreiche, zum Teil selbst konstruierte und in Eigenfertigung hergestellte Prüfstände. Der servohydraulische Prüfstand wird zur Bestimmung der quasistatischen und dynamischen Torsionsbelastung eingesetzt.

Der in **Bild 10** dargestellte Prüfstand kann sowohl für statische als auch für dynamische Bauteiluntersuchungen unter reiner Drehmomentbelastung verwendet werden. Das Drehmoment wird durch eine servohydraulische Stelleinheit (Hydroschwinger) erzeugt. Durch Vorgabe eines elektrischen Stellsignals (Sollsignal) an zwei gegenseitig geschaltete Servoventile wird die durch eine externe Hydraulikpumpe erzeugte hydraulische Energie über den Ventilblock in zwei Druckkammern innerhalb des Schwingers geleitet. Der Druck wirkt auf zwei auf der Antriebswelle befestigte Flügel, die infolge Druck und Ölvolumenstrom gegenüber dem Schwingergehäuse bewegt und verspannt werden. Der Prüfstand kann ein maximales Torsionsmoment von ca. 2500 Nm aufbringen, die Erzeugung einer überlagerten Biegebelastung ist nicht möglich.



**Bild 10:** Servohydraulischer Prüfstand für Bauteiluntersuchungen bei reiner Drehmomentbelastung

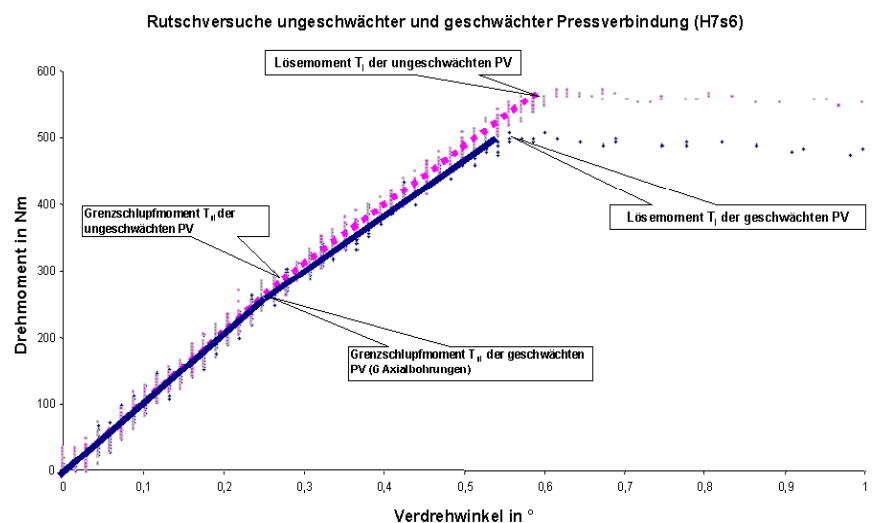
Der Antriebsstrang verfügt zur Vermeidung von Biegung, Querkraft und Fluchtungsfehlern über eingebaute Membrankupplungspaare. Die doppelt angeordneten Membrankupplungen sind extrem torsionssteif und biegeweich, wodurch die infolge Fertigungsabweichungen und die selbst bei hoher Ausrichtungspräzision der Prüfstandsteile und der Prüflinge entstehenden Fluchtungsfehler wirksam vermieden werden können. Die Drehmomentübergabe vom Hydroschwinger auf die Testverbindung erfolgt durch einen außenwirkenden Spannsatz, das Reaktionsmoment wird durch eine reibschlüssige Klemmung des Nabenflansches in einer Lagerungseinheit erzeugt. Die Belastungsaufgabe wird über einen externen Frequenzgenerator vorgenommen, die Überwachung des Verdrehwinkelbereiches erfolgt über einen eingebauten Winkelaufnehmer.

Die Regelung des Prüfstands (drehmoment- bzw. winkel geregelter Prüfbetrieb) wird durch eine Analogelektronik vorgenommen. Wird der zulässige Verdrehwinkelbereich z.B. durch unzulässig große Deformationen oder Bruch des Prüflings überschritten, schaltet die angeschlossene SPS den Prüfstand ebenso automatisch ab, wie bei einer zu hohen Hydrauliköltemperatur oder bei Absinken des Ölstandes im Tank infolge Leckage. Die Messwertspeicherung (Sollsignal, Drehmoment, Verdrehwinkel) geschieht durch einen PC.

### 3.1 Quasistatische Torsionsbelastung

Mit dem Aufbringen eines quasistatischen Torsionsmomentes wurden die Lösemomente geschwächter und ungeschwächter Verbindungen vor einer dynamischen Torsionsbelastung ermittelt.

In **Bild 11** ist der Drehmomentenverlauf bei statischer Verdrehung einer ungeschwächten und geschwächten PV dargestellt. Bis zu einer bestimmten Größe des schlupflosen Torsionsmomentes ( $T_{sl}$ ) erfolgt die Verformung der Fügeflächen von Welle und Nabe ohne Relativbewegungen. Beim Überschreiten der schlupflosen Belastung treten örtliche Verschiebungen zwischen den Fügeflächen auf. Dieser Bereich des örtlichen Gleitens ist die Gleitzone, die, wenn sie sich über die gesamte Pressfuge ausgebreitet hat, zum Durchrutschen der Nabe auf der Welle führt. Der Vergleich zwischen geschwächter und ungeschwächter PV zeigt, dass das schlupflose Torsionsmoment und das Lösemoment bei einer ungeschwächten PV einen grundsätzlich höheren Wert annimmt als bei einer



**Bild 11:** Vergleich des Grenzschlupfmomentes geschwächter und ungeschwächter Pressverbindungen bei gleichem absolutem Übermaß,  $d=30$  mm,  $D = 60$

gleichbaren geschwächten PV gleicher Toleranzklasse.

Nach Überschreiten des Lösemomentes  $T_{l1}$  rutscht die Welle unter der Nabe durch. Bei geschwächten PV fällt das wirkende Rutschmoment  $T_{r1}$  stärker ab als bei ungeschwächten PV. Es zeigt sich weiterhin eine fallende Charakteristik des Rutschmomentes mit zunehmenden Verdrehwinkel bei geschwächten PV gegenüber einen nahezu gleichbleibenden

Verlauf bei ungeschwächten PV. Die experimentell ermittelten Rutschmomente liegen sämtlich über den von Tan Li angegebenen Verminderungsfaktoren der Übertragungsfähigkeit (Bilder 2,4,6).

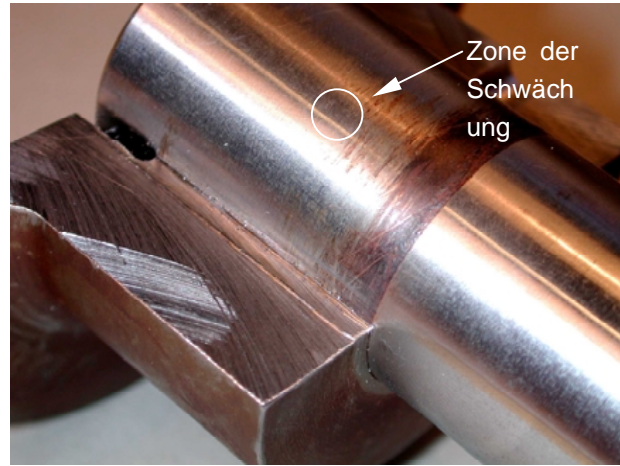
Ausgehend vom Grenzwert des Übermaßes für eine rein elastische Auslegung einer Pressverbindung kann eine Steigerung der Übertragungsfähigkeit durch Zulassen einer Teilplastifizierung des Materials erreicht werden. Dies wurde bei der Passungsauswahl für eine bestimmte Anzahl der Proben berücksichtigt.

Die Rutschversuche führen weiterhin zu der Erkenntnis, dass das übertragbare statische Drehmoment kaum durch die Rauigkeit der spanabhebend bearbeiteten Nabenbohrungen beeinflusst wird. Verbindungen, deren Oberflächen über höhere gemittelte Rauhtiefen verfügen, übertragen durchschnittlich um 2-5% höhere Drehmomente bei statischer Belastung als geometrisch gleichartige Varianten mit geringerer Rauhtiefe. Entscheidend ist die Richtung der Rauigkeit. Ungerichtete Oberflächenrauigkeiten, wie sie z.B. aus dem Kugelstrahlen resultieren, führen zu höheren Haftbeiwerten als gerichtete Rauigkeiten (z.B. Drehriefen), die im Falle der Drehmomentbelastung zusätzlich noch mit der Belastungsrichtung übereinstimmen.

### 3.2 Dynamische Torsionsbelastung

Der überwiegende Teil der Erprobungsträger wurde auf dem 75% des maximalen Rutschmoments über mindestens  $5 \times 10^6$  Lastwechsel getestet. Grundsätzlich konnte bei allen untersuchten Verbindungen nie ein Bruch im Fügebereich beobachtet werden. Das Austreten von Passungsrost, der für Kontaktpartner unter oszillierenden Bewegungen charakteristisch ist, konnte ebenfalls nicht festgestellt werden.

In **Bild 12** ist exemplarisch der Einfluss der Schwächung an einer radial geschwächten PV dargestellt. Es lassen sich deutlich die Einflussbereiche der Schwächung erkennen. In der benachbarten Zone ist die Schlupftiefe und die Reibrostbildung deutlich geringer ausgeprägt.



**Bild 12:** Verschleißspuren an einer Pressverbindung mit radial geschwächter Nabe

Eine Abschätzung der Reibdauerbeanspruchung nehmen Leidich /4/ und Gropp /7/ vor. Sie definieren eine spez. Reibarbeit, die bei Unterschreitung des Wertes zu einer geringeren Reibkorrosion führt und einen Riß im Fugebereich nicht erwarten läßt. Insbesondere wenn der Schlupf  $s$  unter dem tribologisch noch unschädlichen relativen Grenzschlupf ( $s/D_F = 2,6 \cdot 10^{-6}$ ) bleibt. Die spez. Reibarbeit wird bei der radial geschwächten Pressverbindung im Bereich der Nabenkante und im Einflussbereich der Schwächung durch die erhöhte Fugenpressung sowie den höheren relativen Schlupf überschritten. Das Ergebnis ist ein stärkerer Reibkorrosionsfortschritt, vgl. Bild 12.

## 4 Zusammenfassung

Pressverbindungen dienen zum Übertragen von Kräften und Momenten zwischen Welle und Nabe durch Kraftschluss. Funktions- und montagebedingt sind beide Bauteile oftmals mit Axial- oder Radialbohrungen versehen. Diese lokalen Schwächungen führen aufgrund verringerter Bauteilstifigkeiten zu einem verringerten Pressfugendruck und zu Spannungsüberhöhungen im Bereich der Bohrungen. Daher kann der Tragfähigkeitsnachweis nicht mehr mit den Berechnungsvorschriften ungeschwächter Verbindung erfolgen. Durch umfangreiche numerische Untersuchungen verschiedener geschwächter Wellen- und Nabengeometrien ist ein Berechnungsansatz für geschwächte Welle-Nabe-Pressverbindungen erarbeitet worden, der durch die Berücksichtigung von teilplastischen Materialbeanspruchungen eine wesentliche Erhöhung der Übertragungsfähigkeit ermöglicht.

Experimentelle Untersuchungen an ausgeführten Verbindungen bestätigen eindrucksvoll die Richtigkeit des erweiterten Berechnungsansatzes.

## **5 Literatur**

- /1/ Dietz, P.; Tan, L.: Beanspruchungen und Übertragungsfähigkeit geschwächter Welle-Nabe-Preßverbindungen. Antriebstechnik 35 (1996), Heft 4/5
- /2/ Kollmann, F.G.: Welle-Nabe-Verbindungen. Konstruktionsbücher Bd.32, Springer-Verlag, 1984
- /3/ DIN 7190 Preßverbände, Beuth-Verlag, 1988
- /4/ Leidich, E.: Beanspruchung von Pressverbänden im elastischen Bereich und Auslegung gegen Dauerbruch. Diss. TH Darmstadt, 1983
- /5/ Gropp, H.: Die Übertragungsfähigkeit von Längspreßverbindungen bei dynamischer Belastung durch wechselnde Drehmomente. Diss. TH Karl-Marx-Stadt, 1973
- /6/ Tan, L.: Beanspruchungen und Übertragungsfähigkeit der geschwächten Welle-Nabe-Preßverbindungen im elastischen und teilplastischen Bereich. Diss. TU Clausthal, 1993
- /7/ Gropp, H.: Das Übertragungsverhalten dynamisch belasteter Pressverbindungen und die Entwicklung einer neuen Generation von Pressverbindungen. Habilitationsschrift Technische Universität Chemnitz, Fakultät für Maschinenbau und Verfahrenstechnik, 1997



## Konzeption und Bau einer kompakten und transportablen Schneidmühleneinheit zum Zerkleinern von Hausmüll

Birkholz, H.; Grünendick, T.

*Die Kunststoffzerkleinerung hat in den letzten Jahren an Bedeutung gewonnen, da Kunststoffabfälle, die im Rahmen des Dualen Systems Deutschland (DSD) gesammelt werden, wiederverwendet werden müssen. Um aus diesem Gemisch gebrauchter Kunststoffabfälle ein technisch verwertbares Ausgangsprodukt zu gewinnen, muss ein Mahlgut mit ausreichendem Schüttgewicht erzeugt werden. Wesentlich ist hierbei neben der kontinuierlichen Materialzuführung der Abtransport des zerkleinerten Kunststoffs. Gerade der kontinuierliche Betrieb konventioneller Schneidmühlen ist mit Problemen wie Verstopfen im Mühleneinlauf bzw. im Sieb Ablauf und Aufwickeln von Folienteilen am Rotor verbunden.*

*The relevance of controlled crushing of synthetic material has increased due to the dual system (DSD) in Germany for the few years. To get a technically usable product, the new material must be produced with a sufficient pouring weight. There are two important points to remark: removal of the crushed synthetic material and continuous material supply. The continuous operation of conventional cutting mills is connected with problems like blocking the intake and rolling up foil parts at the rotor.*

### 1 Ausgangssituation

Bei Müll, wie er zum Beispiel in Schiffen, Flugzeugen, Großküchen usw. anfällt, wird nicht sorgfältig getrennt, sodass mit dem gleichzeitigen Anfall von zu zerkleinernden Gegenständen z. B. aus Metall, Holz, Textilien oder Hartstoffen wie Glas, Steine oder Keramik zu rechnen ist, die ihrerseits völlig andere Anforderungen an den Zerkleinerungsprozess stellen. Dieser „Hausmüll“ weist somit eine sehr unterschiedliche Zusammensetzung auf. Hinzu kommt gerade bei der hier in Frage kommenden Anwendung im Bereich von Transporteinrichtungen ein im Vergleich hoher Anteil an artfremden Wertstoffen vor – von der Sardinenbüchse bis zum Damenstrumpf –, die von der Mühle mit verarbeitet

werden müssen. Die Zerkleinerung solcher Abfälle stellt an Schneidmühlen hohe Ansprüche.

Vorhandene Mühlen sind aufgrund ihres Gewichtes (1t und mehr) nur stationär einsetzbar. Der variable Einsatz an verschiedenen Orten wird außerdem durch die Größe der Anlagen erschwert. Dies widerspricht den Anforderungen der Industrie, Hausmüll und hausmüllähnliche Abfälle an Orten zu zerkleinern, an denen großvolumige und schwere Anlagen nicht einsetzbar sind (**Bild 1**). Als Beispiel und als besondere Aufgabenstellung für dieses Vorhaben sei der Einsatz im Transportwesen, vor allem der Schifffahrt und dem Flugverkehr, genannt. Gerade auf Langstreckenflügen bietet sich aufgrund der beengten Platzverhältnisse und der steigenden Passagierzahlen der Einsatz von transportablen Zerkleinerungseinheiten an.



**Bild 1:** mögliche Einsatzorte transportabler Schneidmühleneinheiten

Bei den genannten Einsatzorten muß zusätzlich großer Wert auf Lärmschutzmaßnahmen gelegt

werden. Durch umfangreiche Untersuchungen mit Beistellmühlen wurde festgestellt, dass ein Herabsetzen der üblichen Schnittgeschwindigkeit auf etwa 40 bis 50%, d. h. auf Werte von 5 bis 7 m/s, ein Minimum für den Lärmpegel (von der Schneidmühle abgestrahlter Luft- und Körperschall) ergibt. Allerdings tritt bei Schneidmühlen immer das Problem auf, dass das Zerkleinerungsgeräusch über die gewollt großen Aufgabeöffnungen ungehindert austreten kann. Die Lärmentwicklung beim Zerkleinern ist auf Schneidgeräusche und den entstehenden Körper- bzw. Luftschall zurückzuführen. Daher müssen primäre Schallschutzmaßnahmen durchgeführt werden:

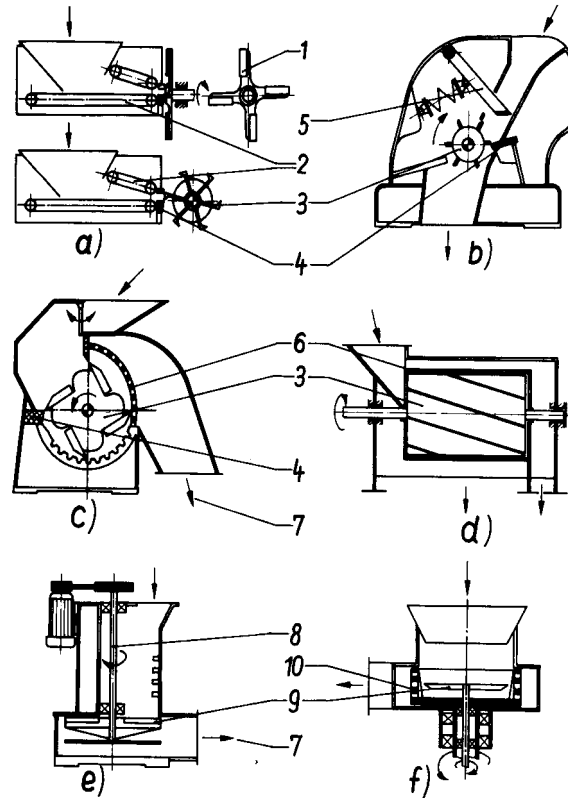
- Verwendung von offenen Rotoren, bei denen die Luft leichter aus der Mühle entweichen kann und das sonst übliche knatternde Geräusch vermieden wird,
- Beschichtung der Mühle mit Anti-Dröhn-Masse,
- geringere Schnittgeschwindigkeiten,
- Aufstellen der Mühlen auf Gummipuffern oder -matten.

## 2 Stand der Technik

### 2.1 Schneidmühlen

In **Bild 2** sind die wichtigsten Grundprinzipien für Schneidmühlen dargestellt, deren Rotationsachse bzw. Kurbelantrieb bei Scheren horizontal oder vertikal angeordnet sein kann. Sie lassen sich in Strang- und Haufwerksschneider einteilen. Bei den Strang- oder Bandschneidern, auch Stranggranulatoren genannt, wird das zu zerkleinernde Gut mittels Zuführwalzen oder -bändern in Form eines endlosen Stranges der Schnittstelle zugeführt, wo es zwischen einem feststehenden Ständermesser und einer rotierenden Messerwalze oder Messerblättern zerschnitten wird. Die Schneidlänge ergibt sich aus der einstellbaren Vorschubgeschwindigkeit sowie der Schnittfrequenz. Je nach Konstruktion ist das Zerschneiden breiter Bänder oder mehrerer Stränge auf einmal möglich (a, b). Soll dagegen stückiges Mahlgut einzeln oder im Haufwerk zerkleinert werden, so werden Haufwerksschneider, bei denen das Aufgabegut einem Aufgabeschacht zugeführt wird, verwendet (c, d, e, f). Derartige Schneidmühlen sind vielfach mit einem Rost bzw. Sieb ausgestattet, um genügend zerkleinerte Partikeln passieren zu lassen. Die zu groben Partikeln werden im inneren Kreislauf mehrfach beansprucht und bei entsprechendem Zerkleinerungsfortschritt ebenfalls durch die

Trennfläche getrieben. Die Umfangsgeschwindigkeiten der Schneidorgane betragen dabei  $v_u = 25$  bis 30 m/s. Bei Elastomeren liegen die Geschwindigkeiten bei  $v_e = 12$  bis 15 m/s. Für die Dimensionierung sind die maximalen Schnittkräfte, die mittels der Scherfestigkeit berechnet werden können, wichtig.



**Bild 2:** Übersicht über die Grundprinzipien von Schneidmühlen, /1/

a + b) Strangschneider

c, d, e, f) Haufwerksschneider

1 Rotormesser; 2 Zuführband; 3

Messerwalze; 4 Ständer- bzw.

Gegenmesser; 5 Rückschlagsicherung; 6

Rost; 7 Auswurfkanal; 8 Antriebswelle mit

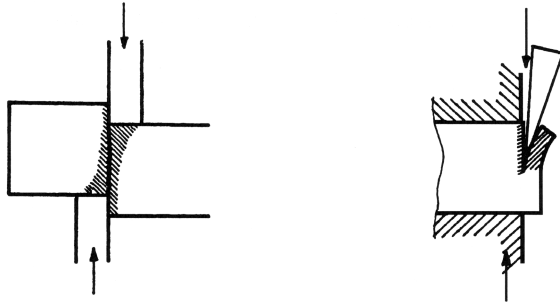
Lagerung; 9 Rotormesser; 10 rotierender Rost

### 2.2 Schneidvorgang

Der Schneidvorgang selbst wird nach unterschiedlichen Kriterien eingeordnet. Man unterscheidet drei Schneidarten: Scher-, Messer- und Beißschnitt. Während beim reinen Scherschnitt die Trennung durch Überschreiten des Formänderungsvermögens entlang der gesamten Schnittlinie in einem Hub erfolgt, schreitet beim Messerschnitt die Trennzone in unmittelbarer Nähe der Schneide linienförmig durch das Schnittgut fort. Beim Beißschneiden wird das Werkstück von zwei aufeinander zu bewegenden Keilmessern

zerkleinert. Die mögliche Anordnung der Schneiden zueinander ist in **Bild 3** dargestellt. Man unterscheidet das Schneiden mit und ohne Gegenschneide.

- Beim Schneiden mit Gegenschneide dient diese entweder nur zur Abstützung der Schnittkraft, oder sie übernimmt gleichzeitig eine aktive Schneidaufgabe.
- Beim Schneiden ohne Gegenschneide wird die Schnittkraft durch Massenkräfte des Zerkleinerungsgutes abgestützt.



**Bild 3:** Anordnung der Schneiden, /2/

Die Aufgabe der Schneidzerkleinerung ist es, einen Festkörper in mehrere Einzelstücke zu teilen. Hierzu ist es notwendig, den Molekülverband im Zerkleinerungsgut mit Hilfe der Schneide aufzutrennen. Bei der Schneidzerkleinerung stellt sich laut Gottberg (1969) /3/ die Schneidspannung in unmittelbarer Nähe der Schneide ein und wird von der Spandeformation und der Trennkraft, die direkt an der Schneide, d.h. an der Druckfläche des Schneiden-radius wirkt, erzeugt. Die geringe Kerbstellenzahl bei nicht kristallinen Körpern, der kleine Schneidenradius des Messers und die Beobachtung, dass die Trennzone der Messerschneide nicht vorausseilt, deuten darauf hin, dass es sich bei der Stofftrennung von weichen Hochpolymeren an der Messerschneide nicht um Bruchvorgänge wie bei spröden Stoffen handelt. Die Molekülverbindungen gleiten unter der Beanspruchung aneinander ab und werden unter starker plastischer Formänderung in unmittelbarer Umgebung der Werkzeugschneide getrennt. Schneiden kann deshalb auch als „Fließen um die Messerschneide“ bezeichnet werden.

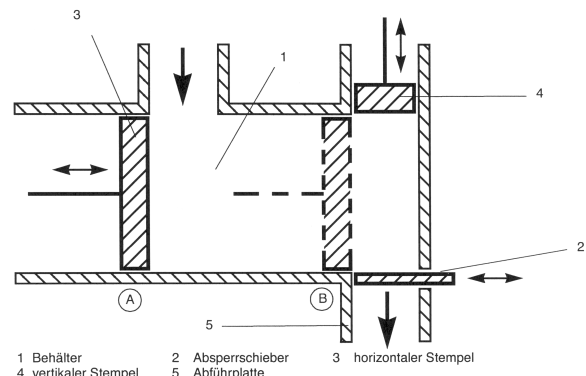
## 2.3 Ergebnisse aus dem SFB 180

Im Forschungsprojekt A 19 des SFB 180 „Konstruktion verfahrenstechnischer Maschinen unter besonderen mechanischen, thermischen und chemischen Belastungen“, wurden Untersuchungen zu einer Verbesserung des Schneidprozesses im Bereich der Kunststoffzerkleinerung durchgeführt.

Der Schwerpunkt der Forschung lag auf der Auswahl der Zerkleinerungsaggregate sowohl für eine erforderliche Vorzerkleinerung als auch für den eigentlichen Schneidprozeß.

### 2.3.1 Kolbenpresse

Ein Hauptproblem bei der Zerkleinerung von Kunststoffgemischen liegt in einer geeigneten Zuführung des Aufgabegutes. Dieses sollte nach einer Vorzerkleinerung den Messern möglichst als homogener Block zugeführt werden. Gleichzeitig muss neben der Zuführung eine Kompaktierung des Aufgabegutes erfolgen. Diese Vorverdichtung wurde mittels einer Kolbenpresse realisiert, die in **Bild 4** dargestellt ist. Ein zusätzlicher Vorteil der Zuführung mittels Kolbenpresse ist eine Minderung der Geräuschemissionen. Die vom Institut für Maschinenwesen der TU Clausthal entwickelten Kolbenpresse wurde auf die Kleinschneidmühle 20/12 RoL der Fa. Hosokawa Alpine aufgesetzt.



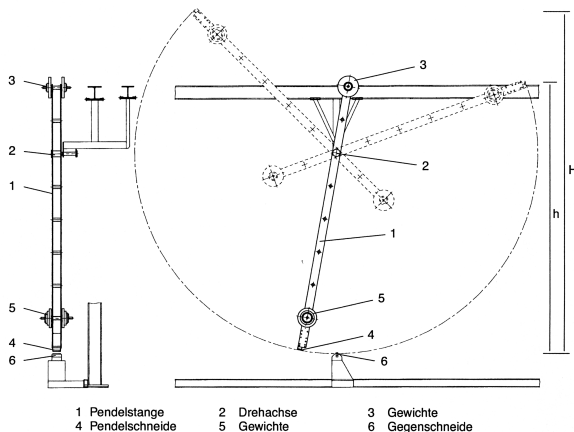
**Bild 4:** Kolbenpresse, /2/

Die Presse besteht aus zwei senkrecht zueinander angeordneten Hydraulikkolben, die mit ihren Stempeln das Füllvolumen der Presse begrenzen. Ein manuell zu bedienendes Schiebersystem bildet den Übergang zwischen der Presse und der Schneidmühle. Zu Beginn des Befüllens des Behälters (1) steht der horizontale Stempel auf Position A. Es wird mit dem Schieber (2) die Zufuhröffnung verschlossen. Nach Befüllen des Behälters mit dem Aufgabegut, wird zunächst der horizontale Stempel (3) bis zum Endanschlag (Position B) verfahren. Anschließend presst der Vertikalstempel (4) die Kunststoffe nochmals zusammen. Nach Öffnen des Absperrschiebers (2) wird der Vertikalstempel weiter als Vorschubkolben eingesetzt. Hierbei wird das Material an der Abfuhrplatte (5) vorbei geschoben und verdichtet und über die offene Querschnittsfläche bis zum Schneidmühlenrotor geführt. Bei einem Kolbendruck von  $15 \times 10^5$  bis  $50 \times 10^5$  Pa ergeben sich Vorschubgeschwindigkeiten zwischen 0,006

und 0,13 m/s bei einer Querschnittsfläche von 120 x 110 mm. Mit diesen Versuchen konnten hauptsächlich Kunststoffgemische mit definierten Einzelschnitten zerkleinert werden. Da die Interpretation dieses Schneidvorganges in der Mühle auf Schwierigkeiten stieß, wurden weitere Mühlenversuche zurückgestellt und ein Pendelschlagwerk zur Untersuchung dieses Einzelschnitts konstruiert und gefertigt.

### 2.3.2 Pendelschlag

Zur Untersuchung des eigentlichen Schneidvorganges wurde ein Pendelschlagwerk für einen definierten Einzelschnitt gebaut. Die maximale Schlaggeschwindigkeit beträgt 10 m/s. Kommerzielle Kerbschlagbiegeprüfstände besitzen Schlaggeschwindigkeiten < 5 m/s, die für eine Schneidmühlensimulation nicht ausreichen. Das in **Bild 5** dargestellte Pendel besteht aus zwei parallel zueinander biegesteif angeordneten Aluminiumprofilen (I), die eine Länge von 4 m besitzen.



**Bild 5:** Pendelschlagwerk, /2/

Die Drehachse (2) teilt das Pendel in einem Verhältnis von 1:3. Durch die zusätzlich angebrachte Masse (3) am oberen Ende der Pendelstange, ist das Pendel physikalisch, d.h. drehmomentfrei, aufgehängt, sodass die Pendelmasse nicht in die Versuche eingeht. Am unteren Ende der Profile ist eine Schneidenaufnahme (4) für die Pendelschneide befestigt. Es lassen sich Scheiden verschiedener Keilwinkel einspannen. Außerdem ist eine Verstellung der Spaltbreite zwischen Schneide und Gegenschneide sowie des Schneidwinkels möglich. In der Nähe des unteren Endes des Pendels kann die Schlagkraft bzw. der Impuls der Schneide durch Auflegen von Gewichten (5) der Masse  $m$ , eingestellt werden. Die Kunststoffprobe wird bei (6) mit einer entsprechenden Vorrichtung eingespannt.

Das Pendel wird an einem Seil nach oben geführt und mittels einer höhenverstellbaren Ausklinkvorrichtung freigegeben. Die Schlaggeschwindigkeit  $v$  lässt sich aus der Höhe  $H$  bzw. dem eingestellten Auslenkwinkel  $\alpha$  und der Pendellänge  $L$ . Der Schneidvorgang wurde bei Geschwindigkeiten untersucht, wie sie auch in Schneidmühlen vorkommen. Dabei werden der zeitliche Ablauf und der Energiebedarf des Schneidvorgangs als Funktion der Kunststoffart, Probengeometrie oder Schlaggeschwindigkeit gemessen.

Aufgrund der Erfahrungen mit Schneiden aus 90MnCrVS wurde bei weiteren Versuchen eine 85°-Schneide aus Hartmetall-K30 (Wolframkarbid) verwendet. Die Schlagzähigkeit nimmt sowohl bei einer Erhöhung der Schlagarbeit als auch des Keilwinkels ab. Eine Veränderung des Schneidwinkels um nur 3° bewirkt für beide Anfangsenergien eine Halbierung der Schlagzähigkeit auf ca. 70 kJ/m<sup>2</sup> für  $E_{potl} = 191$  J sowie ca. 60 kJ/m<sup>2</sup> für  $E_{potl} = 209$  J. Ein Stumpfwerden der Schneide wurde nicht beobachtet.

### 3 Projektidee

Drei Kernprobleme lassen sich feststellen:

1. Konventionelle Mühlen können nicht die gesamte Bandbreite des Mülls verarbeiten.
2. Vorhandene Mühlen sind aufgrund ihres Gewichtes (1t und mehr) nur stationär einsetzbar.
3. Die Lärmentwicklung beim Zerkleinern ist zu hoch.

Damit besteht eine berechtigte Forderung nach einer kompakten und transportablen Schneidmühleneinheit zum Zerkleinern von Hausmüll, die einen bestimmten Grad der Geräuschemission nicht überschreitet und eine ausreichende Fließfähigkeit des Granulats aufweist.

Wesentlich für eine wirtschaftliche Zerkleinerung ist nicht nur eine technisch hochwertige und optimal ausgerüstete Schneidmühle, sondern ebenso die Materialzuführung in die Schneidmühle (kontinuierlich oder diskontinuierlich) und der Abtransport des zerkleinerten Wertstoffs. Dies wird durch zahlreiche Berichte und Untersuchungen untermauert. Der kontinuierliche Betrieb einer konventionellen Schneidmühle ist überwiegend mit spezifischen Problemen wie Verstopfen in Mühleneinlauf und Siebeinlage, Anreicherung und Aufwickeln von Fo-



lien, Bändern oder Textilien im und am Rotor oder mit Anschmelzungen oder Verschweißungen des Materials zwischen Rotor und Gehäuse verbunden. Hinzu kommt, dass das Aufgabegut in Bezug auf Härte, chemische Zusammensetzung und Geometrie höchst heterogen ist und unterschiedliche Zerkleinerungs- und Transportmechanismen erfordert, was einem optimalen Betrieb entgegensteht. Auch bezüglich des Abtransports aus der Mühle werden unterschiedliche Forderungen je nach Einsatzgebiet gestellt: Während der Transport in Containern oder Behältern relativ unproblematisch bezüglich der Geometrie und Konsistenz des abzutransportierenden Gutes ist, haben pneumatische oder hydraulische Transporteinrichtungen hohe Anforderungen an die Gestalt und Gleichmäßigkeit des Gutes und verlangen z.B. Granulate einer bestimmten Größe.

Die von einer Schneidmühle erreichbare Durchsatzleistung und Granulatfeinheit wird durch folgende Bauelemente und Parameter bestimmt:

- Messer (Anzahl, Länge, Anordnung, Verhältnis der Anzahl von Stator- zu Rotormessern, geometrische Form bzw. Schneidwinkel, Werkstoff, Härte)
- Größe des Schneidspalts zwischen Stator- und Rotormessern
- Art des Schnitts, Kinematik der Schnitt- und Transportbewegungen (Parallelschnitt, herkömmlicher Scherenschnitt, Kreuzscherenschnitt, u. a.)
- Rotordrehzahl bzw. Schnittgeschwindigkeit
- Schnittleistung (Anzahl der Statormesser - Anzahl der Rotormesser - Messerlänge - Rotordrehzahl)
- Rotorart (offener Rotor, geschlossener Rotor, Fräsrотор, Spaltrotor, u.a.)
- Mahlraumgestaltung (Anordnung der Statormesser im Einzugsbereich, Optimierung der Annahmefähigkeit, Verhinderung des Blockierens des Schneidrotors)
- Siebeinlage (Gesamtsiebfläche, Lochform und -größe, freie Siebfläche, Siebabstand zum Rotormesserkreis)
- Leistung des Antriebsmotors

Für die Auswahl des Zerkleinerungsmechanismus spielen folgende Einflüsse eine tragende Rolle:

- stapelfähige Komponenten wie Becher, Büchsen u.ä. werden häufig ineinandergestapelt
- unterschiedliche Fraktionen werden so zusammengebracht, daß sie nur schwer voneinander

getrennt werden können (z.B. zusammengeknüllte Folien in Bechern)

- Fraktionen sind teilweise mit Lebensmitteln behaftet, also nur teilentleert bzw. nicht gesäubert
- Fremdfractionen sind im Wertstoffgemisch enthalten
- die Wertstoffzusammensetzung weist jahreszeitliche Schwankungen auf

Untermauert werden die Einflüsse der Zusammensetzung des aufgegebenen Wertstoffgemischs auf den Schneidmühlenbetrieb durch die in beschriebenen Untersuchungen. Infolge der Materialfeuchte - Restfeuchtigkeit bedingt durch Reinigung, Lagerung und Flüssigkeitsreste in Flaschen und Behältern - werden die Maschen der Siebeinlage vom Material zugesetzt, so dass die Absaugung aus dem Mahlraum und damit verbunden der Zerkleinerungsvorgang nahezu vollständig zum Erliegen kommt. Bei der Zerkleinerung von Folien treten zudem erhebliche Unterschiede im Energiebedarf und in dessen Schwankung auf.

Im werkstofftechnischen Bereich liegt der Schwerpunkt auf der Werkstoffauswahl hinsichtlich Beanspruchung (Abrieb) und Leichtbau. Es sollen geeignete Leichtbau-Stähle ausgewählt werden, an denen die mechanisch-technologischen und tribologischen Materialeigenschaften getestet werden. Diese Untersuchungen bilden die Grundlage für die Konstruktion. Der vorgesehene Einsatz der Schneidmühle in Transporteinrichtungen macht darüber hinaus die Konstruktion der Gehäuse, der Ein- und der Auslaufzonen aus Leichtbaustrukturen notwendig.

#### 4 Lösungsweg

Einem methodischen Ansatz folgend, werden die für die erforderliche Bearbeitung des Vorhabens notwendigen Schritte nachfolgend erläutert.

##### **Arbeitsschritt 1:** *Aufnahme des Ist-Zustandes, Kompaktierungs- und Schneidversuche*

Ausgehend von den bereits durchgeführten Untersuchungen im Bereich Schneidmühle soll eine weitergehende Aufnahme des Ist-Zustandes erfolgen, der auch den Bereich der Hausmüll-Zerkleinerung mit einschließt. Daran anschließend sollen Versuche mit standardisiertem Untersuchungsmaterial durchgeführt werden, die verschiedene Schneidenformen und -arten sowie die Möglichkeiten zur Kompaktierung des Materials mit einschließen. Hierbei wird eine handelsübliche

Schneidmühle und eine am Institut entwickelte Kompaktierungseinheit verwendet.

**Arbeitsschritt 2: Aufbau eines Versuchsstandes für Untersuchungen im Bereich "Kompaktieren" und "Vorzerkleinern"**

Die geforderte kompakte Bauweise lässt sich nur bewerkstelligen, wenn einige der bei herkömmlichen Schneidmühlen getrennten Einheiten zusammengefaßt werden. In diesem Forschungsvorhaben soll das Kompaktieren und Vorzerkleinern eine Einheit bilden. Hierzu soll ein Versuchsstand aufgebaut werden, an dem verschiedene Möglichkeiten der Vorzerkleinerung erprobt werden können, z. B. Mehrwellenzerkleinerer, Messerwalzen, Stanzmesser, Walzen, Raspelwelle, Sägegitter. Diese Möglichkeiten der Vorzerkleinerung sollen auf ihre mögliche Anwendbarkeit auf das Kompaktieren des Aufgabegutes untersucht werden.

**Arbeitsschritt 3: Werkstoffauswahl**

Der transportable Einsatz der Schneidmühleneinheit erfordert die Verwendung von "leichten" Werkstoffen. Hier muss eine Auswahl getroffen werden und auf ihre Verwendbarkeit hinsichtlich Abriebfestigkeit überprüft werden. Diese Auswahl soll anhand bestehender Ergebnisse und einer ausführlichen Literaturrecherche erfolgen.

**Arbeitsschritt 4: Entwicklung und Konstruktion der Vorzerkleinerungs- und Kompaktierungseinheit**

Aus den Ergebnissen der Arbeitsschritte 2 und 3 soll in diesem Teilbereich eine Einheit zur Vorzerkleinerung und zum Kompaktieren entwickelt werden. Hierbei soll auf mögliche Lärmquellen geachtet und diese durch konstruktive Maßnahmen ausgeschlossen werden.

**Arbeitsschritt 5: Entwicklung und Konstruktion der Schneideinheit**

Die Konstruktion der Schneideinheit verläuft parallel zum Arbeitsschritt 4. Die Ergebnisse der Werkstoffauswahl finden auch hier Anwendung.

Als Lärminderungsmaßnahmen bieten sich an:

- Rotormesser schräg oder versetzt anordnen, Rotor- und Statormesser gegeneinander schräg stellen (ziehender Schnitt),
- offene Rotorbauweise,
- stabile, schwingungsarme Gehäusekonstruktion,

- Mahlraum von Gestell- und Anbauteilen entkoppeln,
- luftdichte Verbindungen,
- gutes Auswuchten rotierender Teile,
- geräuscharme Lager und Antriebsmotoren.

**Arbeitsschritt 6: Fertigung der neuentwickelten Zerkleinerungseinheit**

Die Kompaktierungs- und Vorzerkleinerungseinheit sowie die Schneidmühleneinheit sollen konstruktiv zu einer Einheit zusammengefaßt werden.

**Arbeitsschritt 7: Zerkleinerungsversuche**

Die Wirksamkeit der neuentwickelten Zerkleinerungseinheit soll mit Hilfe von standardisiertem und von realem Müll getestet werden. Der Prototyp soll außerdem bei den begleitenden Firmen vorgestellt werden und realen Einsatzbedingungen unterzogen werden.

**Arbeitsschritt 8: Bewertung der Konstruktion**

Aufbauend auf den Arbeitsschritten 1 - 7 erfolgt die Bewertung aller Ergebnisse. Hier fließen insbesondere die unter realen Einsatzbedingungen gemachten Erfahrungen (Arbeitsschritt 7) ein.

## 5 Zusammenfassung

Die zu entwickelnde kompakte Schneidmühleneinheit ermöglicht besonders den im Maschinenbau tätigen kleinen und mittleren Unternehmen eine zuverlässige Grundlage für eigene Konstruktionen. Aufgrund der Firmenstruktur (Mitarbeiterzahl, Ausstattung, usw.) sind diese Betriebe oft nicht in der Lage umfangreiche Untersuchungen und Vorversuche durchzuführen. Sie sind dabei auf die Unterstützung unabhängiger Forschungsinstitute angewiesen, die die entsprechenden Kapazitäten im personellen Bereich aufweisen können und Erfahrungswissen im entsprechenden Bereich besitzen.

Gerade im Bereich Leichtbau ist das wirtschaftliche Potential als besonders hoch einzuschätzen. Kleine und mittlere Unternehmen sind meist Zulieferer für die Schiffs- und Luftfahrtindustrie. Ihnen würde mit der zu entwickelnden Schneidmühleneinheit ein Prototyp zur Verfügung gestellt, der ihnen auch auf internationaler Ebene einen Innovationsvorsprung sichern würde.

## 6 Literatur

- /1/ Höffl, K.: Zerkleinerungs- und Klassiermaschinen, Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York Tokyo, 1993

- /2/ Leschonski, K., Dietz, P. (Hrsg.): Untersuchungen zur Zerkleinerung von Kunststoffen in einer Schneidmühle und einem Pendelschlagwerk, Konstruktion verfahrenstechnischer Maschinen, Springer-Verlag, Berlin, 2000
- /3/ Gottberg, J. P.: Untersuchung des Schneidvorganges bei der Zerkleinerung von homogenen Weichstoffen am Beispiel hochpolymerer Kunststoffe, Dissertation, TU Braunschweig, 1969

# Erfassung vollflächiger Schwingungen von Feinblechstrukturen mit dem Einpunktvibrometer?

Käferstein, B.

*Die Studiengesellschaft Stahlanwendung e.V. fördert am Institut für Maschinenwesen ein Projekt zur Bestimmung des Dämpfungsverhaltens in Fügstellen von Feinblechstrukturen. Im Rahmen dieses Forschungsvorhabens wurde zur Erfassung der vollflächigen Schwingungen ein Einpunkt-Laservibrometer am IMW zu einem vollwertigen Scanning Vibrometer umkonstruiert.*

*The Studiengesellschaft Stahlanwendung e.V., a German research association promotes a project at the IMW for the determination of damping coefficients in joint sheet metal structures. Within the framework of this task a single point laser vibrometer was extended at the IMW to a usable scanning vibrometer for measuring full field vibrations.*

## 1 Einleitung

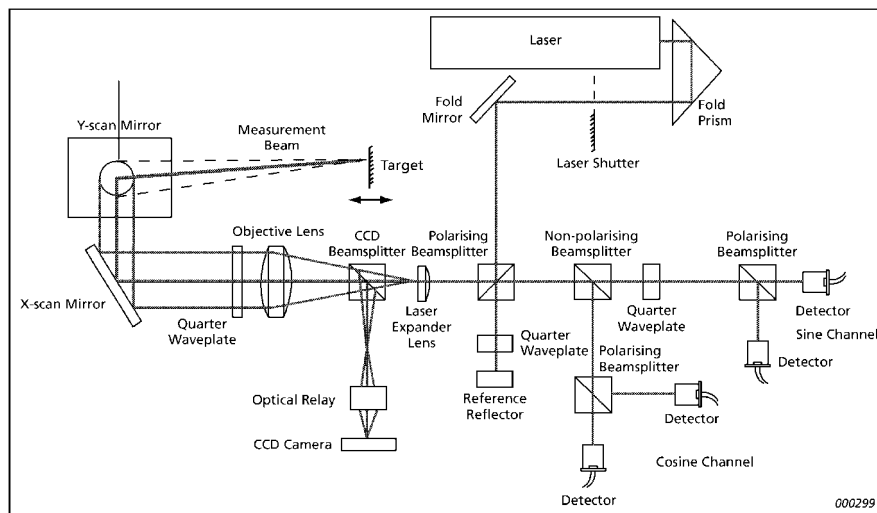
Ein Laservibrometer ist ein interferometrisches Messsystem, das je nach Hersteller auf Basis eines modulierten Laserstrahls arbeitet oder in klassischer Michelson-Bauweise mit entsprechender Auswerteeinheit [1] konfiguriert wird. Gemessen wird die Dopplerverschiebung der Lichtfrequenz aufgrund der Oberflächengeschwindigkeit im Messpunkt senkrecht zur Beleuchtungsrichtung, **Bild 1**.

Selbstverständlich ist es mit einem Einpunktvibrometer nicht möglich, in einem einzigen Messgang die vollflächige Schwingung auf einer Struktur zu erfassen. Man kann aber alle

Punkte z. B. auf einer Platte durch manuelles Anfahren nacheinander prüfen. Bei einer großen Anzahl von Messpunkten ist dieser Aufwand zeitlich nicht mehr zu vertreten, so dass man eine Positioniereinheit benötigt, die z.B. mit Hilfe zweier Spiegel die Objektpunkte abscannt. Über ein hardware- oder softwaregebundenes Signal an die Messwerterfassung wird dieser mitgeteilt, wenn der Fahrvorgang beendet ist, und die Messung gestartet werden kann.

Daraus läßt sich eine Liste notwendiger Komponenten ableiten:

- Ein Einpunktlaservibrometer zur Erfassung der Schnelle (1)
- Eine Verstelleinheit mit 2 Spiegeln, 2 Motoren und zugehöriger elektronischer Steuerung zur Ablenkung des Laserstrahls (2)
- Eine spezifisches Softwareinterface zur Motoransteuerung (3) und mindestens 1 Triggerausgang z.B. als ActiveX-Control oder DLL realisiert.
- Ein Software zur Definition der Fahrwege, Vernetzung der Messbereiche und zur Steuerung des Fahrvorgangs während der Messung mit Ausgabeprotokoll (4)
- Signalerfassungshardware mit Software zur Aufzeichnung von Triggersignal, Referenzsignal und Vibrometersignal (5)
- Signalgenerierung zur Anregung der Struktur (6)

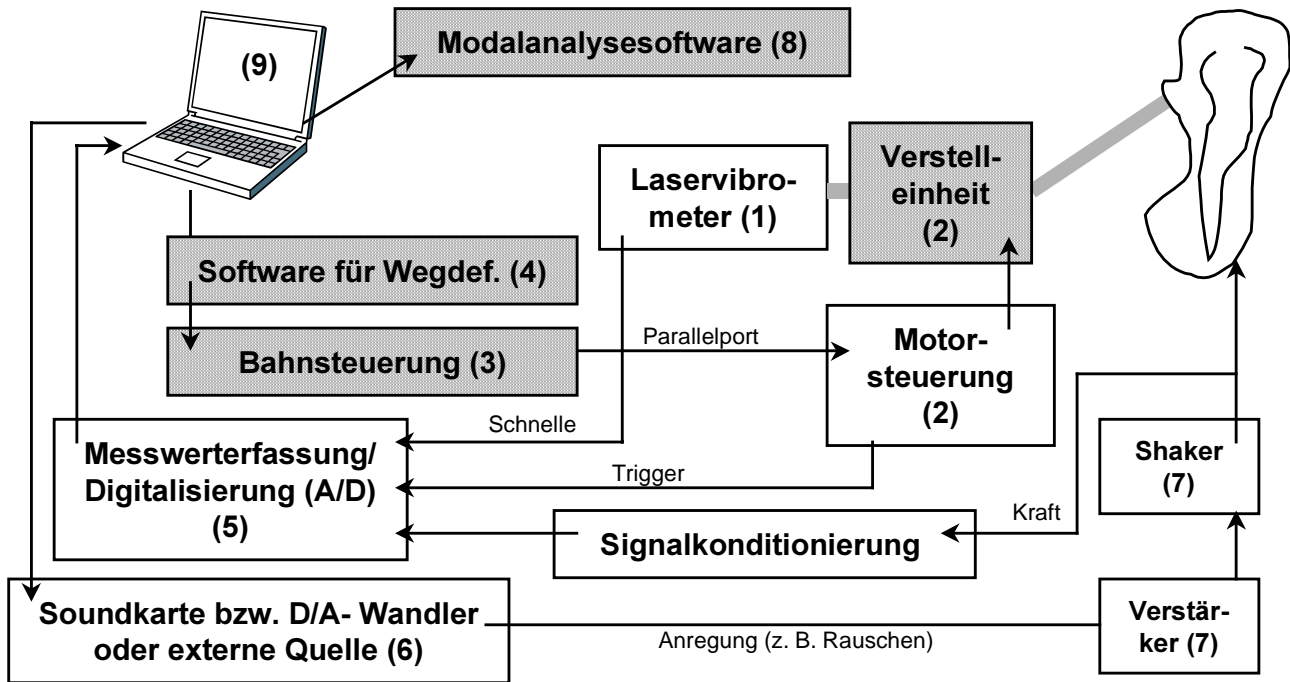


**Bild 1:** Aufbau eines Laservibrometers, B&K, [1/]

• Schwingerreger, (z.B. Shaker, Magnet), Leistungsverstärker, Referenzaufnehmer (vorzugsweise Kraft oder Beschleunigung) und Messverstärker (7)

• Eine Software für das Postprocessing (8) zur Modalanalyse und Betriebsschwingungsanalyse

• Ein oder mehrere Rechner (9), die Leistungs-, Anbindungskomponenten und Schnittstellen für die Komponenten (3), (4), (5), evtl. (6) und (8) zur



**Bild 2:** Aufbau und Zusammenspiel der Einzelkomponenten des am IMW aufgebauten Scanning-Vibrometers. Die Schraffur kennzeichnet die selbst entwickelten Bauteile und Softwareschnittstellen

Verfügung stellen.

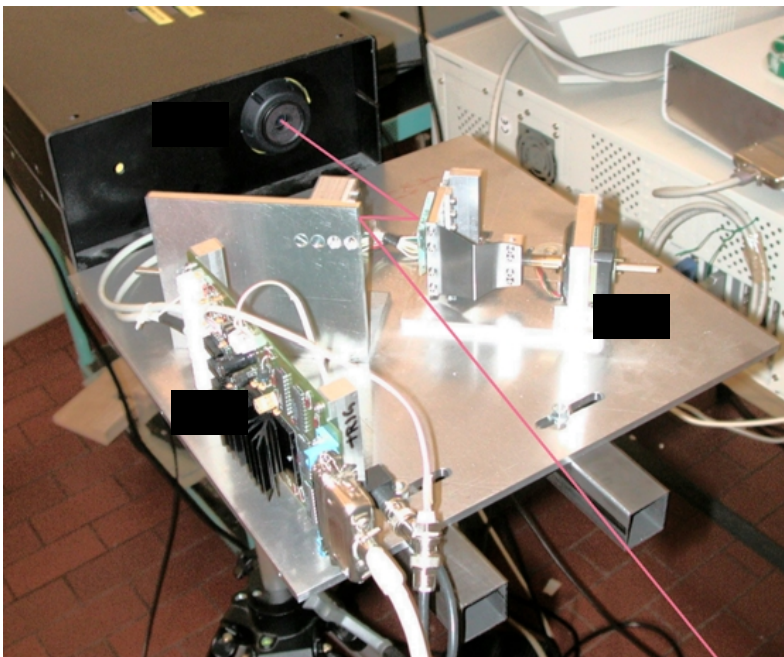
Da der Kostendruck auch an einer Universität nicht unerheblich ist, wurde nach einer möglichst günstigen Möglichkeit gesucht, die Ansteuerung aufzubauen. Dabei fiel die Wahl auf eine recht weit verbreitete Schrittmotorsteuerkarte der Fa. Conrad-Elektronik mit Schrittmotoren aus 5¼" Diskettenlaufwerken, die häufig für Plotter, Teleskopsteuerungen o.ä. eingesetzt wird. Da für diese Karte nur ein Softwareinterface für DOS zur Verfügung stand, mussten weitere Anstrengungen unternommen werden, um auch unter Windows NT/2000 die Karte direkt ansprechen zu können. Die Karte hat im wesentlichen nur die Aufgabe, ein

Richtungs- und Taktsignal, das am Parallelport ausgegeben wird, in zwei für Schrittmotoren konforme, phasenverschobene Leistungssignale zu wandeln.

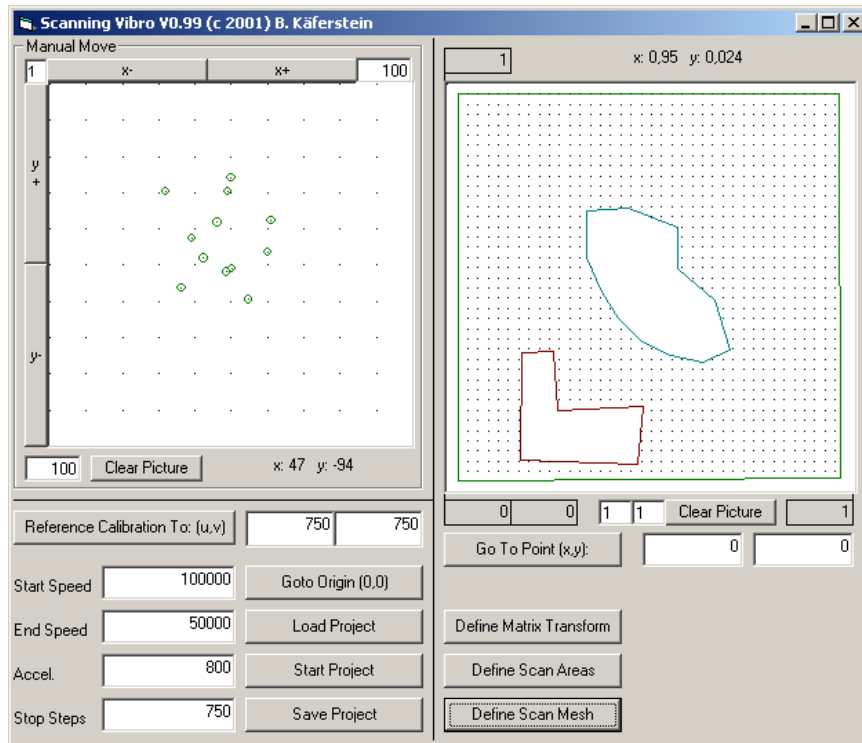
## 2 Hardware und Ansteuerung

Den mechanischen Kern bilden 2 im Strahlengang unter 45° angeordnete Schrittmotoren mit Gewindespindel, die über eine Schubstange je einen Klappspiegel betätigen. Die Oberflächenspiegel mit Al-Beschichtung zur Vermeidung von Doppelreflexionen sind auf Metallplatten mit spielfreier Lagerung über Federblechstreifen geklebt. Beide Spiegeleinheiten sind um 90° verdreht, so dass eine vertikale und horizontale Strahlauslenkung möglich wird, **Bild 3**. Für kleine Kippwinkel bleibt der Strahlengang in erster Näherung linear mit dem Winkel. Es ist dennoch empfehlenswert, etwas grössere Abstände zum Messobjekt zu wahren, um keine Verzerrungen des Messfeldes zu erzeugen. Es ergibt sich etwa eine Auflösung von 2 mm bei einem Messobjekt von 1x1m in 4m Abstand. Auf den Einbau einer Kamera wurde verzichtet, da die Steuerung visuell vorgenommen werden kann.

Die Schrittmotorsteuerkarte wird mit max. 30V und 800mA Gleichspannung versorgt. Die Steuersignale erhält man über den Druckerport. Da Windows NT/2000 über eine sogenannte HAL (Hardware Abstraction Layer) verfügt, kann der Druckerport nicht direkt aus Programmen für Schreib- Lesezugriffe eingesetzt werden. Um diesen



**Bild 3:** Mechanische Konstruktion des Scanning-Vibrometers



**Bild 4:** Hauptfenster der Steuerungssoftware

Schutzmechanismus auszuhebeln, wurde eine spezielle Software eingesetzt, die es erlaubt, direkt in die Register des Parallelports die Taktsignale zu schreiben. Damit das aber nicht innerhalb der Software für die Wegdefinition geschehen muss, wurde eine DLL in C auf Basis der vorhandenen DOS 2.0 Software implementiert. Diese DLL kann von anderen Programmiersprachen wie Pascal, Visual-Basic oder Matlab angesprochen werden und bietet eine höhere Abstraktionsebene und komplexere Befehle wie z.B. „Referenzfahrt“, „Fahre Achse X auf Pos ...“ usw.

### 2.1.1 Software zur Wegdefinition

Die Software zur Definition der Fahrwege setzt sich aus mehreren Unterprogrammen mit graphischer Benutzeroberfläche zusammen:

| x         | y     | u      | v    |
|-----------|-------|--------|------|
| 0         | 0     | -101   | 388  |
| 350       | 0     | -113   | -422 |
| 350       | 120   | 87     | -432 |
| 0         | 120   | 89     | 398  |
|           |       |        |      |
|           |       |        |      |
|           |       |        |      |
|           |       |        |      |
|           |       |        |      |
| -0,02     | 1,625 | -103,5 |      |
| -2,342857 | 0     | 393    |      |
| 0         | 0     | 1      |      |

Clear Table

= xy2uv Matrix

Calculate Matrix

Close

**Bild 5:** Kalibrierung der Verstelleinheit auf reale Bauteilkoordinaten

Die Hauptanwendung, **Bild 4**, bietet links ein Fenster, wo durch Bewegungen mit der Maus oder den Cursortasten der Laserstrahl automatisch auf dem Bauteil in Weltkoordinaten (die natürliche Sichtweise des Benutzers) platziert wird. Rechts daneben ist das Bauteil in gedrehten und entzerrten Objektkoordinaten (z.B. mm) dargestellt. Links unten können interne Parameter an die DLL für die Ansteuerungen der Motoren übergeben werden, um eine schnelle Positionierung zu erreichen.

Zusätzliche Funktionen für Referenzfahrten und große bzw. kleine Fahrgeschwindigkeiten sind um die Fenster angeordnet. Rechts unten sind weiterführende

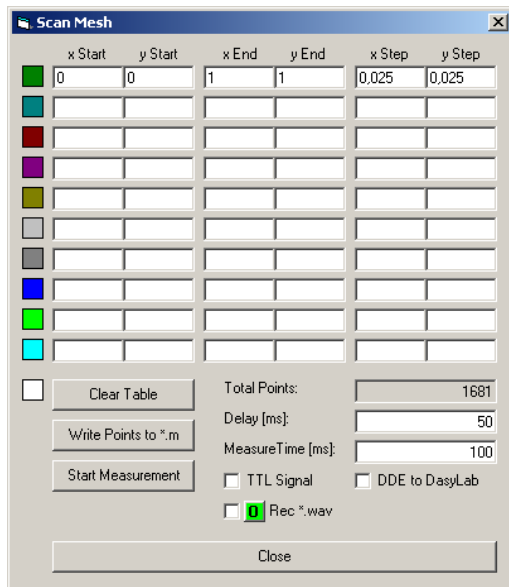
Menüpunkte für Kalibrierung, Definition der Messgitter und Auswahl von Messflächen vorhanden. Um nicht immer alle Einstellungen neu vornehmen zu müssen, sind zusätzliche Grundfunktionen für das Laden und Speichern bzw. das schnelle Anstarten des Messprojektes implementiert worden.

Eine Kalibrieranwendung, mit der die Pixelkoordinaten des Anzeigefensters in reale Bauteilkoordinaten umgerechnet werden, **Bild 5** sorgt dafür, dass man die Vernetzung direkt in lokalen Koordinaten vornehmen kann. Zur Transformation der Laserstrahlposition im Weltkoordinatensystem auf die Ortskoordinaten wird eine lineare Abbildung mit Hilfe einer Matrix realisiert. Damit ist nicht nur eine Drehung und Verschiebung, sondern auch eine achsenabhängige Skalierung und Verscherung möglich. Der Verscherungsterm wurde nicht entfernt, um die nichtlinearen Effekte des Laserstrahlverlaufs in der Spiegeloptik besser kompensieren zu können.

Zur Kalibrierung gibt man mehrere Referenzpunkte vor: Als erstes wird eine Referenzfahrt der Achsen durchgeführt. Danach werden mehrere -mindestens 4- Referenzpunkte mit dem Laserstrahl unter Zuhilfenahme der Cursortasten und der Maus angefahren, die automatisch in die rechte Tabelle, **Bild 5**, übertragen werden. Links gibt man dann die tatsächlichen Bauteilkoordinaten z.B. in mm ein. Das Programm errechnet danach durch eine Least-Squares-Approximation die Koeffizienten der Transformationsmatrix, die ab jetzt für die Ansteuerung der Schrittmotoren in Bauteilkoordinaten verwendet wird.



Das Bauteilfenster in Bild 4 wird automatisch auf lokale Koordinaten umskaliert, so dass dort die Vernetzung der Bereiche ebenfalls in Bauteilkoordinaten mit der Maus oder durch Eingabe per Tastatur vorgenommen werden kann. Der nächste Schritt ist die Definition der Vernetzung. Mit dem Programm ist es möglich, auf einem Bauteil kartesische Messgitter mit völlig unterschiedlicher Aufteilung in X- und Y-Richtung zu erzeugen, um kleine Bauteilbereiche feiner zu vernetzen, als grobe, **Bild 6**. Ein Netz wird entweder durch manuelle Eingabe der Koordinaten oder durch Anfahren der Positionen mit der Maus im Bauteilkoordinatenfenster als Rechteck festgelegt. In diesem Fenster ist zusätzlich eine Funktion zum Abspeichern der Gitterpunkte als Matlab-Datei für ein späteres Postprocessing eingebaut. Man kann für jeden Messpunkt die Verweilzeit definieren und die Verzögerungszeit zwischen Ende der Fahrt und Anstieg des Triggersignals, um sicherzustellen, dass sich der Aufbau beruhigt hat.

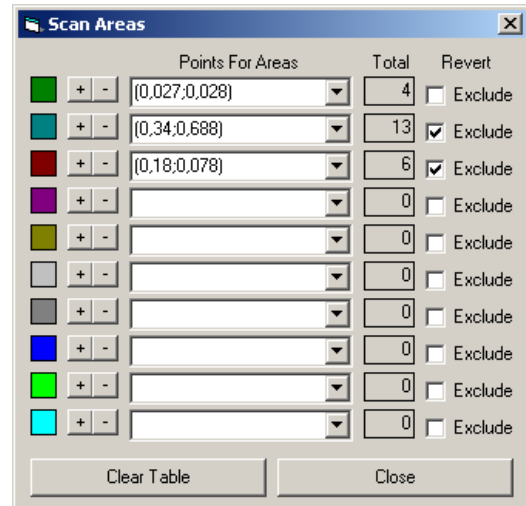


**Bild 6:** Definition der Messgittergrößen

Neben der Anbindung an eine beliebige Messwerterfassung über das Triggersignal kann speziell die Messwerterfassungssoftware DasyLab über einen Softwarelink (Dynamic Data Exchange, DDE) angesprochen werden, so dass man sich einen Messkanal einsparen kann. Für einfache und schnelle Messungen ist auch der Gebrauch der Soundkarte möglich. Dann wird, sobald ein neuer Gitterpunkt angefahren ist, eine Datei im WAV-Audioformat mit steigender Numerierung über die Soundkarte des Rechners aufgezeichnet.

Um beliebig geformte Flächen zu vernetzen und um „ins Leere“ laufende Messpunkte zu eliminieren, müssen in einem zweiten Schritt noch die Berandung des Messobjekts und Aussparungen wie Löcher oder Halterungen durch Einzeichnen von Polygonlinien definiert werden, **Bild 7**. Es können beliebig viele Eckpunkte auf Bauteilkanten

mit dem Laserstrahl angefahren und zu einer geschlossenen Berandungsfläche verbunden werden. Durch Negation ist es möglich, Löcher innerhalb einer anderen, äußeren Berandung zu definieren. Letztendlich werden nur die Punkte zeilenweise abgetastet, die alle Randbedingungskurven erfüllen. Bezogen auf die Messzeit ist dieser Vorteil jedoch gering: das Verhältnis Messzeit zu Verfahrzeit ist meist deutlich größer als 5, so dass praktisch nur die Verweilzeit am Messpunkt die Gesamtabtastdauer bestimmt.



**Bild 7:** Definition der äußeren und inneren Berandungen

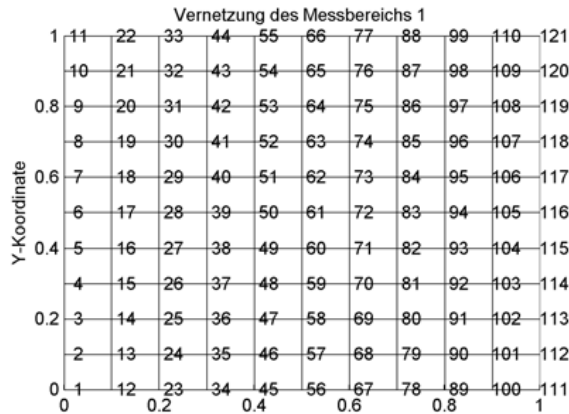
### 3 Signalkette

Nachdem alle Messgitter und Randbedingungen definiert wurden, kann die Messung gestartet werden. Verwendet man nicht DasyLab oder die Soundkarte, muss man zuerst die Signalerfassungssoftware starten und danach den Scanvorgang einleiten. Die Unterscheidung zwischen Messphase und Bewegungsphase wird durch den Triggerpegel definiert. Für den Test ist ein geeignetes Signal in den Shaker einzuspeisen. Hier hat sich die Ausgabe von künstlich generiertem Rauschen über die Soundkarte des PC, das CDROM-Laufwerk bzw. die Anregung durch ein spezielles, externes Schwingregelsystem mit Überwachungsfunktion bewährt. Mit Rauschen ist keine Synchronisation zwischen Generator und Vibrometer erforderlich. Man hat jedoch im Vergleich zum Chirp, Impuls oder der Impulsfolge den Nachteil, dass das Messrauschen relativ stark die Ergebnisse beeinflusst. Durch entsprechend längere Messzeiten kann dieser Nachteil jedoch teilweise kompensiert werden.

Der Vorteil beim Einsatz des zusätzlichen Triggersignals ist die Unabhängigkeit von der Messwerterfassungshardware. Praktisch jeder kommerziell verfügbare Signalanalysator hat einen Triggereingang, der es erlaubt, Aufzeichnungen ereignisgesteuert vorzunehmen und Transferfunktionen zu berechnen, die dann an ein Modalanalysepaket weitergeben werden können.

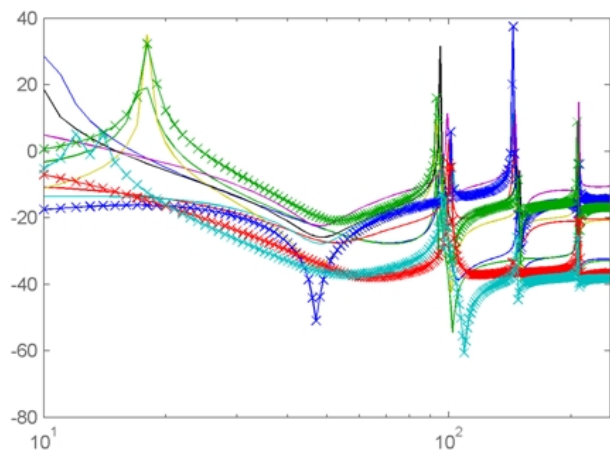
#### 4 Postprocessing

Unter dem Postprocessing versteht man die Weiterverarbeitung der Messdaten zu aussagekräftigen Kennzahlen oder Graphiken. Nachdem die Zeitdaten abgespeichert sind, werden Sie in Matlab importiert und für jedes Messpunktpaar aus Referenzsignal und Schnellesignal anhand des Triggersignals eine Übertragungsfunktion (hier H1) berechnet.



**Bild 8:** Vernetzung des Messbereichs mit Nummer und Position der Messpunkte

Diese werden exakt dem Messgitter zugeordnet, **Bild 8**, dessen genauen Bauteilkoordinaten aus der Wegdefinition berechnet und exportiert wurden. Für eine bessere graphische Darstellung werden die komplexwertigen Übertragungsfunktionen über das Gitter interpoliert und in einem Frequenzdiagramm selektiv dargestellt. Mit Hilfe der Maus kann der Benutzer eine Frequenz auswählen und sich dazu die Animation der Schwingungsform darstellen lassen, **Bild 9**.

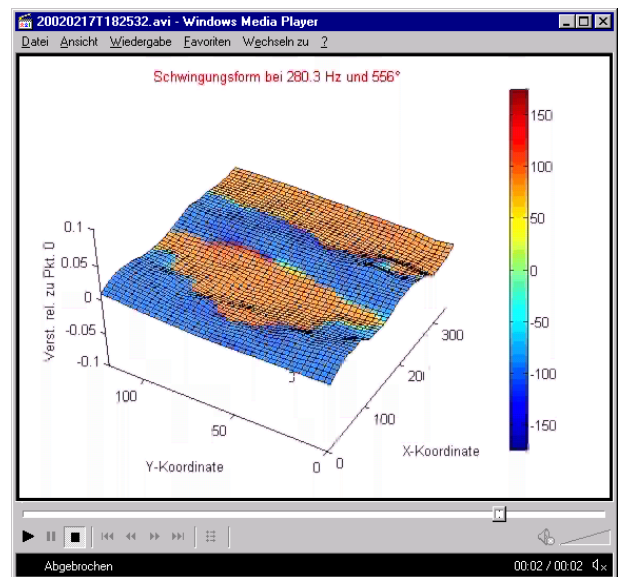


**Bild 9:** Übertragungsfunktionen zur Selektion für die Darstellung der Schwingungsformen

Dabei ist als Auslenkung im 3D-Plot z.B. der Vergrößerungsfaktor darzustellen und als zusätzlich überlagerte Farbkodierung z.B. die Phasenlage relativ zum Anregungspunkt. Die Animation selbst, **Bild 10**, **Bild 11** und **Bild 12**, wird dadurch gesteuert, dass der Referenzpunkt, der beliebig ausgewählt werden kann, harmonisch angeregt wird und mit Hilfe der ermittelten

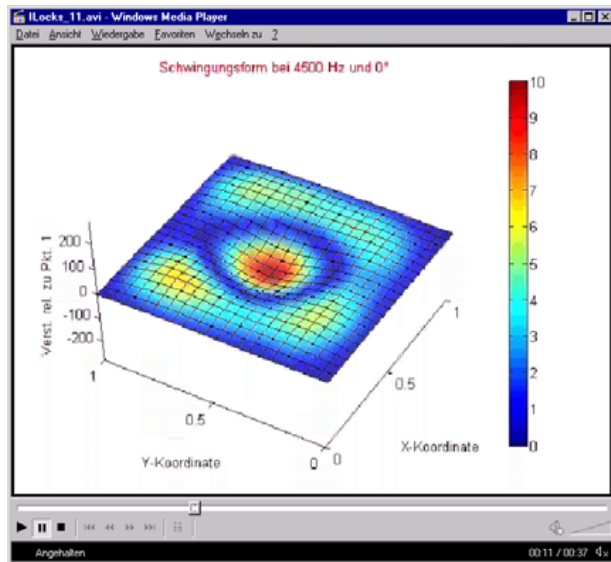
Übertragungsfunktionen zu den anderen Punkten bei dieser Frequenz deren Verschiebung durch Multiplikation bestimmt wird. Eine weitere Möglichkeit zur Animation besteht darin, bei konstanter Phasenlage die Frequenz zu verändern, so dass man einen Überblick erhält, wie dicht einzelne Moden zusammenliegen und wie stark die Kopplung und die Übergangsphase zwischen den Moden ausgeprägt ist. Die Animationen lassen sich problemlos als AVI oder MPEG Videos exportieren und in Word-Dokumente einbinden. Am IMW steht für eine exakte Auswertung der Modalparameter SDTools (Structural Dynamic Toolbox) zur Verfügung, das sich nahtlos in Matlab eingliedert und somit ohne grosse Konvertierung die Messdaten weiterverarbeitet werden können.

**Bild 11** und **Bild 12** zeigen die zweiten Biegegeschwindigkeiten einer mittig mit dem Shaker angeregten Struktur, die an allen Rändern fest eingespannt sind. **Bild 11** ist eine Platte aus sog. „Interlocked Elements“. Das sind viele kleine Tetraeder, die sinnvoll aneinandergereiht wurden und allein durch Fixierung in den Ebenenrichtungen eine biegesteife Platte bilden, ohne dass Klebstoffe eingesetzt wurden.

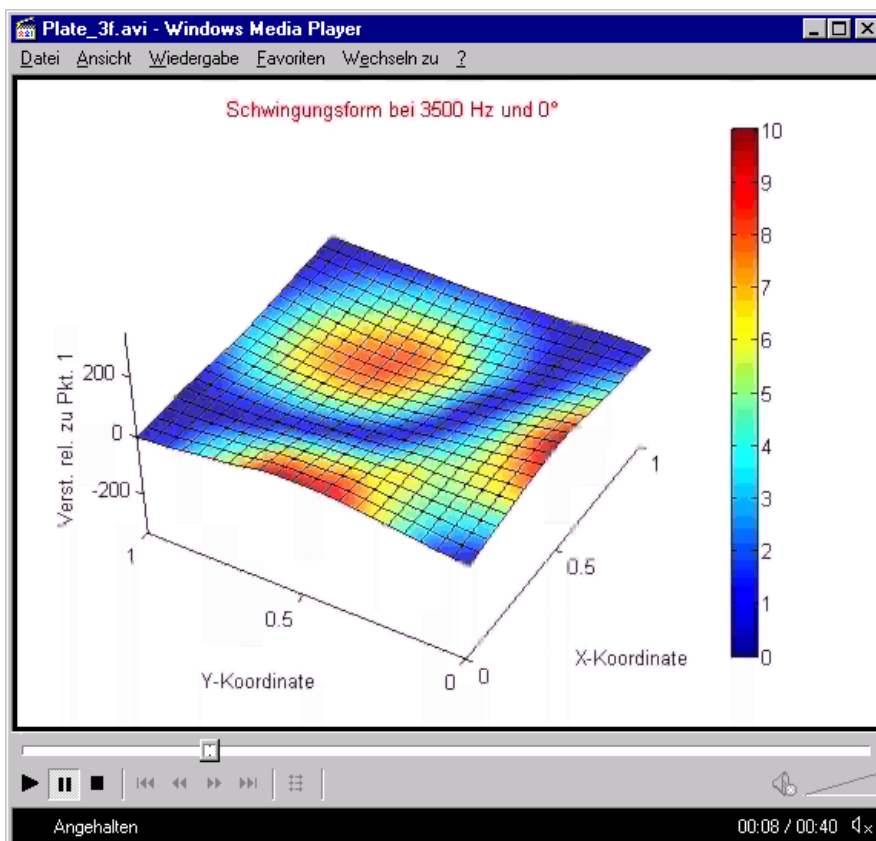


**Bild 10:** Zweite Biegegeschwindigkeitsform einer links unten und rechts oben steif eingespannten Blechplatte von 0.75mm Stärke.





**Bild 11:** Eigenschwingungsform an einer Platte aus zusammengesteckten Tetraedern, mittig



**Bild 12:** Eigenschwingung an einer Aluplatte

angeregt, Ränder fest eingespannt

**Bild 12** ist ein dazu untersuchtes Referenzbauteil aus Vollmaterial mit gleicher spezifischen Masse pro Fläche, um einen direkten Vergleich der Steifigkeit vornehmen zu können. Man erkennt, dass am Rand die Einspannung nicht ideal fest ist. Der Grund ist, dass die Tetraederstruktur ein viel kleineres Schubmodul hat und sich besser an kleine Ebenheitsabweichungen der Einspannung anpasst als die Vollplatte aus Alu.

## 5 Zusammenfassung

Aus handelsüblichen Elektronikbauteilen und vorhandener Software wurde eine Ablenkeinheit mit Ansteuerungs- und Auswertekomponente für ein Einpunkt-Laservibrometer entwickelt. In Anbetracht der eingesetzten Teile sind die damit erzielten Ergebnisse sehr zufriedenstellend, vor allem, wenn man mit kommerziellen Systemen vergleicht, deren Hardware mehr als das 100-fache kostet. Für eine exakte Auswertung können die Transferfunktionen in ein kommerzielles Modalanalysepaket eingelesen werden.

## 6 Literatur

- /1/ Brüel&Kjaer: PRODUCT DATA: Ometron Scanning Laser Doppler Vibrometer - Type 8330, Näerum, 2002. Internet: <http://www.bksv.com/pdf/Bp1896.pdf>
- /2/ Etienne Balmes: SDTools Structural Dynamics Toolbox for use with Matlab. Users Guide 4.1, Paris, 2001. Internet: <http://www.sdtools.com>

## Verbesserung der Erodierereigenschaften von lasergesinterten Elektroden für das funkenerosive Abtragen

Trenke, D.

*Seid Anfang diesen Jahres läuft am IMW ein Projekt, um die Qualitätsmerkmale von lasergesinterten Elektroden für das funkenerosive Abtragen zu verbessern. Hierzu werden neue Sintermaterialien und Nachbearbeitungsverfahren untersucht. Kooperationspartner ist dabei die in Osterode ansässige Firma Eisenhuth (Präzisionsformenbau). Gefördert wird das zweijährige Projekt vom Europäischen Fonds für regionale Entwicklung (EFRE).*

*Since the beginning of this year, the IMW keeps a project, to improve the quality characteristics of laser sintered electrodes for the electro-discharging machining. New sinter material and post-processing procedures are analyzed therefore. Partner in this cooperation is the Eisenhuth company (Precision mould making) located in Osterode. The two year project is sponsored by the European Regional Development Fund (ERDF).*

### 1 Einleitung

Durch den Rapid Tooling Lasersinterprozess können innerhalb kürzester Zeit komplexe Formen für den Gummi- und Kunststoffspritzguss hergestellt werden. Durch die beim Bauprozess bislang verwendeten Metallpulver besitzen die gefertigten Formen allerdings raue Oberflächen und geringe Standzeiten. Eine Lösung für das Problem stellt das Sintern von Elektroden für das funkenerosive Abtragen dar. Mit Hilfe dieser Elektroden können Kavitäten in Werkzeugstähle mit hoher Verschleißbeständigkeit und Oberflächenqualität hergestellt werden.

Die zur Zeit im Rapid Tooling Verfahren produzierbaren Elektroden führen aber zu ungenügenden

Erodierergebnissen. Dies liegt zum überwiegenden Teil an dem zu hohen und ungleichmäßigen Elektrodenabbrand im Vergleich zur Werkstückabtragrate.

Innerhalb des Projektes soll deshalb ermittelt werden, durch welche Maßnahmen sich die Erodierereigenschaften von lasergesinterten

Elektroden verbessern lassen. Dazu werden folgende Wege untersucht:

1. chemisches Beschichten von Rapid Tooling Elektroden mit Kupfer
2. direktes Sintern von Kupferpulver oder Beimischen von Kupferanteilen in handelsübliche Sintermaterialien
3. Infiltration der Sinterelektroden mit elektrisch leitenden Harzen
4. Herstellung von Graphit-Elektroden in Rapid Tooling Formen

Der Erfolg des Projektes führt dabei zu nachstehenden wirtschaftlichen und technologischen Vorteilen:

Durch das schnelle Herstellen von Sinterelektroden für das funkenerosive Abtragen lassen sich die Fertigungszeiten für erodierte Spritzgussformen in beachtlichem Maße verkürzen. Dem entsprechend verringern sich auch die Zeiten, bis die gewünschten Positivteile aus Gummi, Silikon oder Kunststoff gefertigt sind. Da es gerade bei der Vorab- oder Kleinserienproduktion auf möglichst frühzeitige Liefertermine ankommt, verbessert sich die Markt- bzw. Konkurrenzsituation des Technologieanwenders erheblich.

Hinzu kommt, dass das Sintern von komplexen Elektroden auf einer Rapid Tooling Anlage wesentlich kostengünstiger ist, als die Herstellung mit konventionellen Fertigungsverfahren.

### 2 Bisherige Arbeiten und Ergebnisse

Nach Erarbeitung der theoretischen Grundlagen und Aufstellung der Zeit- und Untersuchungspläne begannen die praktischen Versuche und Auswertungen.

#### 2.1 Chemisches Beschichten

Im ersten Untersuchungsblock wurden die lasergesinterten Elektroden aus DirectMetal 50 chemisch mit Kupfer beschichtet. Im Gegensatz zur galvanischen Beschichtung, bei der sich das Werkstück zwischen einer Anode und einer Kathode befindet, erfolgt die chemische

Beschichtung in einer Lösung, aus der das Metall (hier Kupfer) ausfällt und sich auf dem Werkstück niederschlägt. Auf diese Weise lassen sich wesentlich gleichmäßigere Schichten auf die Bauteile auftragen, als beim galvanischen Beschichten.

Der verwendete Versuchsaufbau ist in **Bild 1** dargestellt.



**Bild 1:** Laboraufbau zum chemischen Beschichten

Das Vermessen der beschichteten Sinterelektroden auf einer Koordinatenmessmaschine ergab, dass durch dieses Verfahren nur sehr dünne Kupferschichten (max. 0,5 mm) aufgetragen werden konnten. Zudem zeigten angefertigte Schliffbilder, dass sich innerhalb der porösen Elektroden kein Kupfer abgelagerte. Dementsprechend ungenügend waren die Verbesserungen des Erodierverhaltens, wie durch Vergleichssenkungen mit unbeschichteten Sinterelektroden nachgewiesen wurde. Des Weiteren ist die Anbindung des aufgetragenen Kupfers auf den Elektroden unzureichend, wodurch einzelne Beschichtungsbereiche beim Erodieren abplatzen.

## 2.2 Lasersintern von Kupferpulver

Wesentlich vielversprechendere Ergebnisse zeigen die Versuche, die Elektroden direkt aus technisch reinem Kupfer zu lasersintern:

Hierfür musste zunächst ein Bauplattformwerkstoff gefunden werden, auf dem die Elektroden im Sinterprozess aufgebaut werden können. Experimente zeigten, dass hierfür bronzebeschichtete Stahlplattformen am besten geeignet sind.

Im weiteren wurden dann die Prozessparameter:

- Laserleistung / Lasergeschwindigkeit,
- Fülllinienlänge / Fülllinienabstand und
- Schichtstärke

dahingehend verändert, dass sowohl innerhalb der einzelnen Schichten als auch zwischen diesen eine feste Verbindung entsteht (siehe **Bild 2**).

Im weiteren Projektverlauf werden diese Sinterparameter und zusätzlich noch die Korngröße und Korngrößenverteilung des Kupferpulvers sowie die Prozessatmosphäre variiert, um die Festigkeit, Dichte und Oberflächenqualität der Sinterelektroden zu steigern.



**Bild 2:** Gesinterte Proben aus reinem Kupfer

## 2.3 Infiltration der Sinterelektroden

Ein weiterer Projektpunkt, der zur Zeit untersucht wird, ist die Infiltration der gesinterten Elektroden mit elektrisch leitendem Material. Hierfür wurden bislang Experimente mit Harzen und Kupferpasten unternommen. Von Nachteil sind allerdings die hohen Kosten für die elektrisch leitenden Harze, während technisch dieses Verfahren sehr ausgereift ist.

## 3 Zusammenfassung

Die bisherige Projektarbeit ergab, dass sich durch das Lasersintern von technisch reinem Kupferpulver Elektroden direkt für das funkenerosive Abtragen herstellen lassen. Ziel einer weiteren Optimierung der Prozessparameter ist es, die Erodierereigenschaften noch zu verbessern und eine Nachbearbeitung der gesinterten Elektroden durch Beschichten oder Infiltrieren überflüssig zu machen.

Des Weiteren muss untersucht werden, in wie weit Elektroden aus Graphit in lasergesinterten Formen hergestellt werden können.

#### **4     Literatur**

- /1/   Müller, N.; Trenke, D.: Antrag „Verbesserung  
der        Erodierereigenschaften        von  
lasergesinterten Elektroden“, IMW Clausthal  
2001

# Das Gleitlager als Körperschallübertragungselement in Maschinen

Nsenga Biansompa, E.

*Im Körperschalleitweg von Maschinen mit gleitgelagerter Welle ist zwischen dem Anregungsort und der luftabstrahlenden Strukturoberfläche das Gleitlager eine entscheidende Schnittstelle. Die Fragestellung ist: wie lässt sich der Vorgang dieser Körperschallübertragung von Gleitlager beschreiben und bestimmen. Am Institut für Maschinenwesen wird eine Literaturrecherche über die Körperschallübertragung in Gleitlager durchgeführt und daraus wird im folgenden dieser Vorgang erklärt. Die Berechnung durch Simulationsmodelle mittels Mehrkörpersystem oder Finite Elemente Methode ist auch Gegenstand dieses Schreibens und auch einige angestrebten weiteren Untersuchungen werden vorgeschlagen.*

*The hydrodynamic bearing is an important interface between the noise source and the noise radiation surface in the path of transmission of structure-borne noise for the machine with a shaft supported by hydrodynamic bearing. The question is: how the structure-borne noise can be transmitted through an hydrodynamic bearing and can be described and determined. This procedure of transmission is explained in the following from the literature search accomplished at the institute for mechanical engineering. The computation by means of simulation model of multi-body system or finite element method is also a matter of this paper and also some further desired investigations are suggested.*

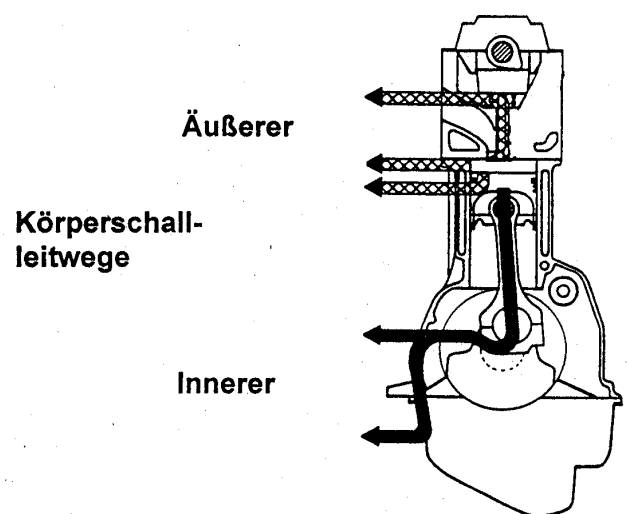
## 1 Einleitung

In der allgemeinen Maschinenakustik wird in „direkt“ und „indirekt“ erzeugten Luftschall unterschieden. Bei der direkten Luftschallanregung wird die umgebende Luft durch Druckausgleichsvorgänge oder turbulente Bewegungen zu Schwingungen angeregt. Bei der indirekten Luftschallentstehung bewirken Wechsel- und Stoßkräfte innerhalb einer Maschine Schwingungen der gesamten Maschinenstruktur, die, sofern sie im hörbaren Frequenzbereich von 16 Hz bis 16000 Hz liegen, als Körperschall

bezeichnet werden. Daraus wird die Maschinenstrukturoberfläche zu Schwingungen angeregt, die wiederum die angrenzende Luftschicht zu Schwingungen anregen („Körperschallerregte Luftschallabstrahlung“).

Gleitlager stellen im allgemeinen Maschinenbau weitverbreitete Konstruktionselemente dar. Sie dienen der Aufnahme von Wellen oder Achsen in Maschinen wie Getrieben, Verbrennungsmotoren, Werkzeugmaschinen, Kompressoren, Pumpen, große Mühlen, Steinbrecher, usw. Aufgrund des Arbeitsprozesses in diesen Maschinen werden dynamische Kräfte erzeugt, die die Bauteile zu Schwingungen (Körperschall) angeregt.

Bei Gleitlagergetrieben z.B. werden die Zähne des Zahnrades durch zeitabhängige Verzahnungskräfte zu Biegeschwingungen angeregt. Dieser erzeugte Körperschall breitet sich über den Zahnrad aus. Die Welle-Nabe-Verbindung im Zentrum des Zahnrades leitet den Körperschall zur Welle weiter. Von hier gelangt er über das Gleitlager an die Stelle der Lagerbohrung in das Gehäuse (Körperschallübertragung) und breitet sich über die schallabstrahlende Maschinenoberfläche aus.



**Bild 1** Innerer und äußerer Körperschalleitwege eines Verbrennungsmotors /1/

Bei Verbrennungsmotoren z.B., **Bild 1**, ist für die Geräuschenstehung der Kurbeltrieb eine sehr wesentliche Funktionsgruppe. Er besteht aus Kolben, Bolzen, Pleuel und Kurbelwelle. Über die Kurbelwelle werden die Gas- und Massenkkräfte in das Kurbelgehäuse geleitet. Außerdem treten zwischen den Kurbeltriebsbauteilen Stöße auf, wenn das für die Funktion notwendige Spiel durchgelaufen wird. Der daraus resultierende Körperschall wird in den Hauptlagern, den Koppelstellen zwischen Kurbelwelle und Motorstruktur, in die für die Motorgeräuschabstrahlung dominierende Blockstruktur übertragen.

Wie oben erwähnt ist zwischen dem Anregungsort und der luftschallabstrahlenden Struktur oberfläche innerhalb dieses Körperschalleitwegs das Gleitlager im allgemeinen die akustisch entscheidende Schnittstelle.

Die Fragestellung ist: wie läßt sich der Vorgang dieser Körperschallübertragung von der Wellenzapfen über das Gleitlager in die Lagerstruktur beschreiben und bestimmen.

## 2 Mechanismen der Körperschallanregung und -übertragung im Gleitlager

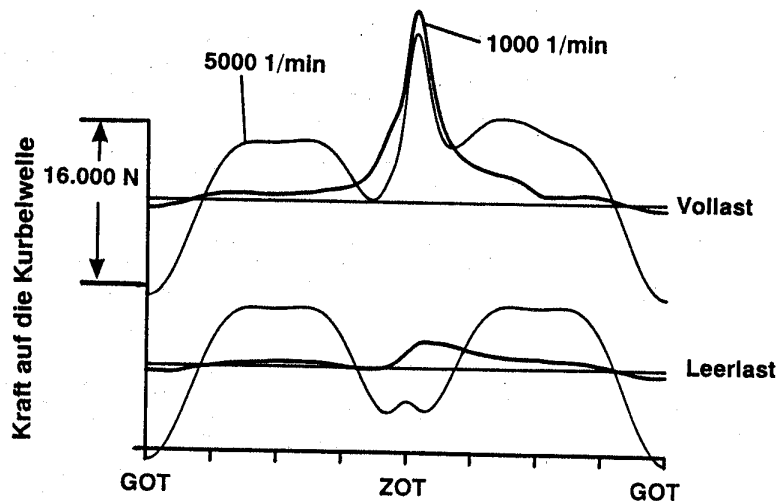
Zur Berechnung der Schwingungen von gleitgelagerten Wellen werden die stark nichtlinearen, anisotropen Federungs- und Dämpfungseigenschaften des Schmierfilms im allgemeinen durch vier Federungs- und vier Dämpfungskoeffizienten linear angenähert.

Die Federungs- und Dämpfungskoeffizienten sind für ideale Betriebsbedingungen bisnach der Gleitlagertheorie abhängig von der Sommerfeldzahl bzw. der statischen Gleichgewichtslage ( $\varepsilon, \gamma$ ) des Zapfens, dem Lagerbreitenverhältnis  $B/D$  und der Lagerbohrungsform (Schmierspaltfunktion  $\bar{H}(\gamma)$ ) bzw. Lagertyp, Spielverhältnis  $\psi_{\max}/\psi_{\min}$ , Einbauwinkel. Ferner kann der Einfluss einer elastischen Verformung der Lagerschale infolge des Schmierfilmdruckes berücksichtigt werden (Elastohydrodynamische Rechnung). Der Einfluss der Bauformen der Lagerschalenabstützung, eines elastischen Lagerbocks oder des Gehäuses bzw. Fundaments können bei Schwingungsrechnung des Systems auf theoretischem oder experimentellem Wege ermittelt und berücksichtigt werden.

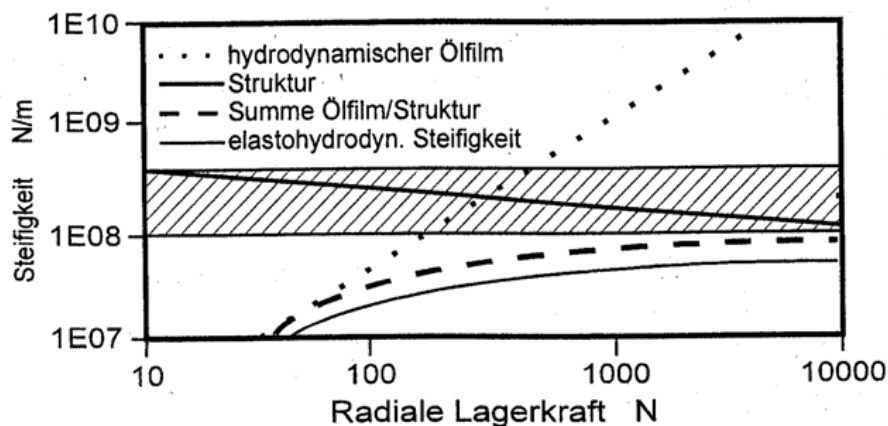
Somit benötigt man für diese Schwingungsrechnung das Kraftgesetz des Lagers, welche Kraft wiederum nichtlinear von der Lage und der Geschwindigkeit des Wellenzapfens abhängt. Bei Lagern, die statisch belastet sind, z.B. durch das Eigengewicht des Rotors, befindet sich der Zapfen auf einem Punkt der Verlagerungsbahn. Für kleine Störkräfte, wie kann bei Getrieben der Fall sein, wird das Kraftgesetz um diesen Betriebspunkt linearisiert und die dynamischen Lagereigenschaften werden durch je vier Feder- und Dämpfungskonstanten ersetzt. Sind die Lager statisch unbelastet oder die Störkraft sehr groß, wie es z.B. bei Verbrennungsmotoren der Fall ist, wo die Betriebskraft sehr stark instationär ist, dann genügt diese Vorgehensweise nicht mehr und man benötigt den gesamten Kraftverlauf für den bewegten Zapfen. Die momentane Kraft im Lager ergibt sich aus der Druckverteilung im Schmierfilm. Diese erhält man durch Lösen der Reynoldsschen Differentialgleichung.

Bei Verbrennungsmotoren beispielsweise erfolgt an den Hauptlagern die Kopplung der Kurbelwelle und Motorblock über den Schmierfilm, der einen Festenkörperkontakt zwischen den beiden Bauteilen im Motorbetrieb verhindert. Dabei sind die Anregungen der Struktur in den Hauptlagern eine Hauptursache der Körperschallschwingungen des Kurbelgehäuses. Die primäre Anregungsursache sind Stöße zwischen Kurbelwelle und Lager; während der Phasen schallharten Ölfilms wird zusätzlich Körperschall von der Kurbelwelle in das Hauptlager übertragen. Während der Körperschallübertragung ins Hauptlager entsteht zwischen dem Hauptlager und der Kurbelwelle eine Körperschallbrücke, wobei der Ölfilm schallhart ist. Der Zustand eines schallharten Ölfilms (d.h. die Ölfilmsteifigkeit ist viel größer als die Struktursteifigkeit), wie er bei starker Verspannung -z.B. infolge der Gaskräfte- vorliegt, wird durch Vorgabe der Struktursteifigkeit, welche zuvor durch statische Verformungsrechnungen ermittelt werden kann, angenähert. Der quasi lastfreie Zustand einer nicht verspannten Kurbelwelle kann durch eine niedrige Gesamtsteifigkeit simuliert werden /1/.

**Bild 2** und **Bild 3** zeigen die resultierende Kraft auf die Kurbelwelle eines Verbrennungsmotors und der Einfluss der Lagerbelastung auf die hydrodynamischen Gesamtsteifigkeit von Ölfilm und Motorblockstruktur, wobei schon bei geringen Belastungen des Lagers die Ölfilmsteifigkeit über



**Bild 2:** resultierende Kraft auf die Kurbelwelle bei  
Vollast und Leerlast für  $1000 \text{ min}^{-1}$  und  $5000 \text{ min}^{-1}$  / 1/



**Bild 3:** Einfluss der Lagerbelastung auf die hydrodynamische Gesamtsteifigkeit von Ölfilm und Motorstruktur /6/

der Steifigkeit der Hauptlagerstruktur liegt. Im Kurbelwinkelintervall des höchsten Verbrennungsdruckes liegt die radiale Ölfilmsteifigkeit um eine Zehner-Potenz über der Steifigkeit der Motorblockstruktur. Die radiale Kopplung wird somit überwiegend von der Struktursteifigkeit der Hauptlager bestimmt.

Durch die Schiefstellung des Grundzapfens kommt es zur radialen Verkantung zwischen Kurbelwelle und Hauptlagern, was zur axialen Schwingungen der Hauptlagerstege führt. Durch die Verkantung von Kurbelwelle und Hauptlager infolge von Kurbelwellenverformungen (aufgrund der Gaskräfte während der Verbrennung) wird ein Biegemoment in die Hauptlager eingeleitet. Da die Hauptlagerstege in axialer Richtung weich sind, geben sie diesem Moment nach. Bei der

anschließenden plötzlichen Entlastung der Kurbelwelle wird die Verspannung der Bauteile gelöst, und die Stege schwingen mit ihrer axialen Eigenfrequenz frei aus.

### 3 Akustische Simulationsverfahren

Heute werden mit der steigenden Rechnerleistung die akustischen Simulationsverfahren vielfach auf der Basis von Berechnungen nach der Methoden der Finiten Elemente (FEM) durchgeführt. Somit können in einer frühen Entwicklungsphase die ersten akustischen Eigenschaften eines Systems (z.B. Kurbelwellen – Hauptlager- Kurbelgehäuse) beurteilt und bereits Optimierungsschritte erarbeitet werden.

Es gibt verschiedene Möglichkeiten zur rechnerischen Nachbildung der Schwingungsvorgänge im System Welle– Lager- Lagerstruktur. Unterschieden wird dabei der Modellierungsgrad der einzelnen Strukturen, der Modellansatz sowie die Berücksichtigung des Ölfilms zwischen der Welle und der Lagerstruktur im Radial und Axiallager.

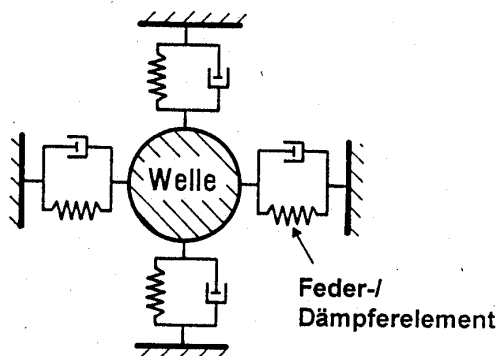
Man kann das Modell von Mehrkörpersystem (Mehrmassenschwinger) verwenden, wobei die Welle und das Lagerstruktur (Schale, Gehäuse und Fundament) als starr betrachtet werden. Die Kopplung der Massen erfolgt mittels Feder- und Dämpfungselementen des Schmierfilms im Lager, auch der Elastizität des Lagergehäuses und die Feder- und Dämpfungseigenschaften der Koppelstelle der Lagerschalen in Gehäusebohrung (Lagerschalenabstützung) sollen berücksichtigt

werden. Damit ist das Übertragungsverhalten im akustischen Frequenzbereich einfach berechenbar. Die genaue Bestimmung der Modellparameter dagegen ist aufwendig.

Bei der Analysen mittels der Finiten Elemente Methode wird Beispielsweise in /1, 2/ das Schwingungsverhalten der Strukturen -Kurbelwelle und Motorblock- unter bestimmten Kopplungsbedingungen untersucht. Dazu wurden zunächst detaillierte 3D-Modelle der Kurbelwelle und Motorblock erstellt und dann vernetzt. Diese rechnerische Untersuchungen des gekoppelten Strukturverhaltens wurde mit der FE-Software „ANSYS“ durchgeführt. Dabei war sowohl das statische als auch das dynamische Verhalten zu untersuchen.

Diese FE- Modelle von Kurbelwelle und Motorblock dienten in erster Linie der Simulation des Betriebsschwingungsverhaltens der Kurbelwelle bis ca. 1000 Hz und im weiteren der genaueren Untersuchungen von Interaktion zwischen Kurbelwelle und Motorblock bei unterschiedlichen Kopplungsbedingungen sowie der Analyse des Körperschallübertragungsverhaltens auch bei höheren Frequenzen.

Die richtige Simulation des Ölfilms in den Hauptlager ist das eigentliche Problem bei der akustischen Berechnung des Systems Kurbelwellen - Hauptlager - Motorblock. Die Kopplung zwischen Kurbelwelle und Motorblockstruktur wird je nach Anwender entweder vereinfacht mit linearen Feder-/Balkenelementen oder mit nichtlinearen Feder-/Dämpferelemente realisiert.



**Bild 4:** Radiale Anordnung der Feder- und Dämpferelemente /2/

Zur Begrenzung des Rechenaufwandes wurden unter vereinfachten Lagerungsbedingungen die Eigenschwingungsformen der gelagerten

Kurbelwelle berechnet. In **Bild 4** wird eine schematische Darstellung des hierfür verwendeten Radiallagermodells gezeigt. Es wurden für die Modellierung der Radiallager und des Schulterlagers (Axiallager) jeweils vier gegen fest wirkende Federn derselben Steifigkeit angesetzt.

Da über die im Motorbetrieb in den Hauptlagern vorliegenden Kopplungsbedingungen keine genaue Informationen vorliegen, wurden die Auswirkungen verschiedener Kopplungsvarianten auf das Übertragungsverhalten des Systems im Rahmen einer Parametervariation untersucht. Hierbei wurden die Parameter bewußt in einem sehr weiten Bereich variiert. Diese Variation liefert Informationen über den Einfluß der Gesamtsteifigkeit (Ölfilm- und Struktursteifigkeit) auf das Schwingungsverhalten des Systems.

Anhand von Vergleichen mit Messergebnissen wurden dann Aussagen über die im Betrieb vorliegenden Größen gewonnen.

#### 4 Beschreibung des Übertragungsverhaltens

Die Beschreibung der Körperschallübertragung innerhalb des Systems bzw. zwischen zweier Komponenten - wie Welle-Lagerstruktur- wird mittels einer Transferfunktion ermöglicht. Die Transferfunktion vom Anregungs- zum Meßort entspricht dem Quotient aus gemessener bzw. gerechneter Körperschallbeschleunigung oder - schnelle und die eingeleiteter kraft. Bei der Ermittlung dieser Funktion wird immer von einem linearen Strukturverhalten ausgegangen, Nichtlinearitäten werden vernachlässigt. Das Übertragungsverhalten von Einzelnen Bauteilen erfüllt diese Voraussetzung sehr gut. Die Ermittlung dieser Funktion ist sowohl mit der Modalanalyse als auch mittels FE- Berechnungen möglich.

In **Bild 5** werden die Spektren der axialen Schulterlager- und Kurbelwellenbeschleunigungen eines Dieselmotors, jeweils für den Fall mit und ohne Hauptlagerversteifung gezeigt. Daraus kann die Beschleunigungsübertragungsfunktion zwischen beiden Bauteile ermittelt werden. Die Kurven zeigen bei 1500 und 2500 Hz eine Körperschallpegelüberhöhung, die durch die Übertragung von Kurbelwelle in das Schulterlager verursacht sind. Umgekehrt findet keine Übertragung der Hauptlagerdeckel-Eigenschwingungen (700 Hz) auf die Kurbelwelle,

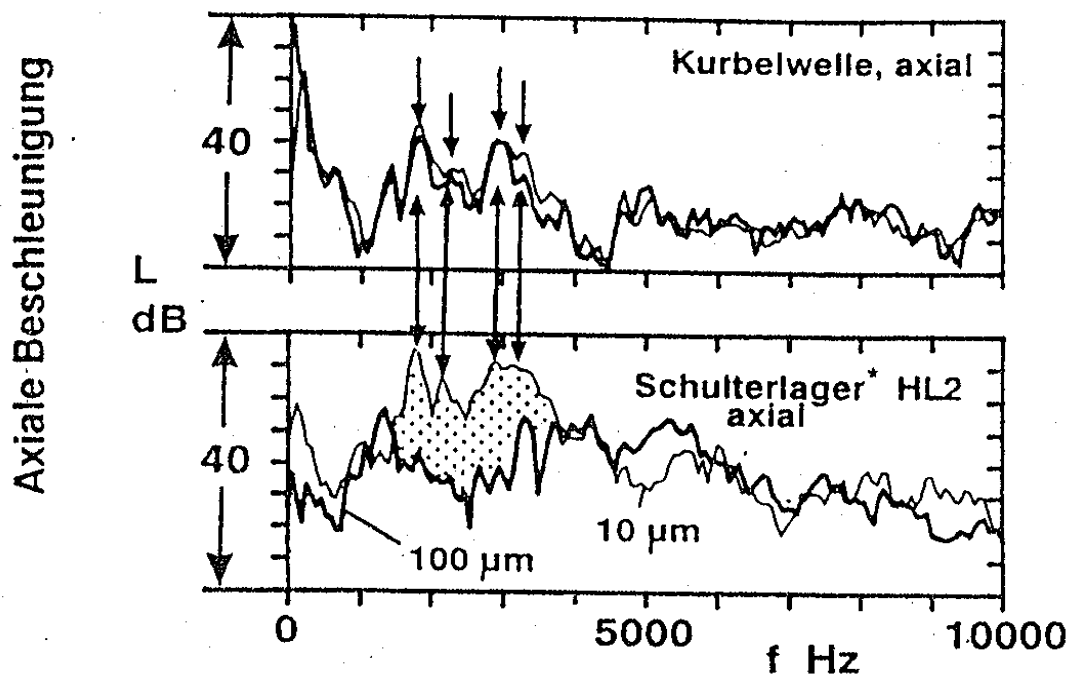


da die Kurbelwellenimpedanz im Vergleich zu der Schulterlager höher ist /2/.

Der Verbund der Hauptlager als Strukturmaßnahmen bewirkt eine axiale Versteifung des Schulterlagerbereiches, was das Körperschallübertragungsverhalten bei axialer Anregung im Schulterlager akustisch günstig beeinflusst.

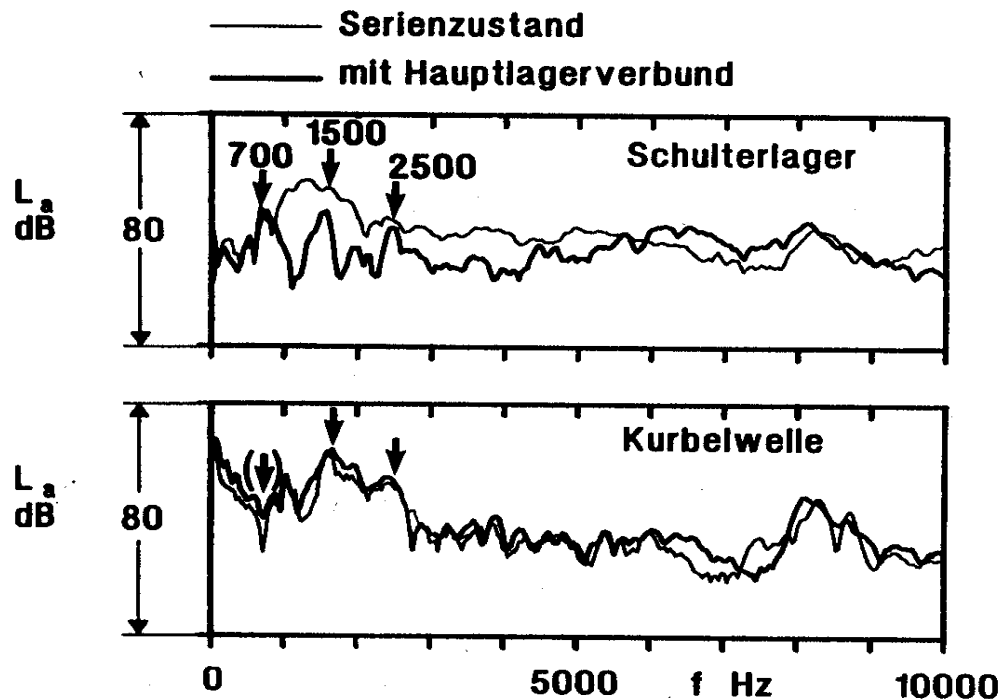
In **Bild 6** ist der Einfluss des Axialspiels am Schulterlager eines Ottomotors auf die axiale

Körperschallübertragung von Kurbelwelle in das Lager deutlich zu sehen. Wie in **Bild 5** gibt es keine Rückwirkungen vom Schulterlager auf die Kurbelwelle.



**Bild 6:** Frequenzanalyse der gemessenen axialen Beschleunigungen am Deckel des Schulterlager und am freien Kurbelwelle eines Ottomotors für 100  $\mu\text{m}$  und 10  $\mu\text{m}$  Axialspiel, bei 1000  $\text{min}^{-1}$  und Vollast /1/

verschiedenen Gleitlagerparametern sowohl Betriebs- (Last, Drehzahl, Schmierölviskosität und –



**Bild 5:** Spektren der axialen Schulter- und Kurbelwellenbeschleunigung eines Dieselmotor , bei  $1750 \text{ min}^{-1}$ , Vollast,  $45 \mu\text{m}$  Axialspiel [2/]

## 5 Zusammenfassung

Im Körperschalleitweg von Maschinen mit gleitgelagerten Wellen sind die Gleitlager im allgemeinen die akustisch entscheidende Schnittstelle; zusätzlich spielen die Schmierfilmeigenschaften bei der Ankopplung der Welle an die Lagerstruktur eine wichtige Rolle.

Die Körperschallübertragung erfolgt in den Zeitintervallen hoher Verspannung zwischen Welle und Lagerstruktur, wobei der Schmierfilm im Lager so sehr eingespannt ist, dass er als schallhart zu betrachten wird. Der Zustand schallhartes Ölfilms herrscht, wenn die Ölfilmsteifigkeit größer als die Lagerstruktursteifigkeit ist. Dabei spielt die Struktursteifigkeit eine bedeutende Rolle. Das Körperschallübertragungsverhalten, das mittels einer Transferfunktion zwischen Welle und Lagerstruktur beschrieben werden kann, kann experimentell oder rechnerisch durch Finite Elemente- Simulationsmodell des Systems ermittelt werden.

Über dieses akustische dynamische Verhalten von Gleitlager gibt es weniger Erkenntnisse. Es soll darüber weitere Untersuchungen unter

temperatur) als auch geometrische Parameter (Lagertyp, Lagergröße (Durchmesser  $D$  und Breitenverhältnis  $B/D$ , Spielverhältnis ), Lagerschalenabstützungsart, Lagerstruktursteifigkeit) durchgeführt werden, damit weitere Aussagen zum Übertragungsverhalten und zu Geräuschminderungsmaßnahmen an Gleitlagern getroffen werden können.

## 5 Literatur

- /1/ Schönherr, C.: Geräuschenstehung durch die Interaktion von Kurbelwelle und Motorblockstruktur. Diss. TH Aachen, 1995
- /2/ Wilhelm, M.; Strohe, M.: Axialschlag im Triebwerk. Körperschallanregung der Motorstruktur durch axiale Bewegungen der Kurbelwelle. Forschungsberichte Verbrennungskraftmaschinen, Heft 505, 1992
- /3/ Welte, L.: Dynamische Lagerankopplung. Ankopplung der Kurbelwellenhauptlager an die Motorstruktur unter dynamischer Krafteinleitung. Vorhaben Nr. 456 Abschlußbericht FVV, Heft 536, 1993

- /4/ Gutzmer, P.; Philipp, U.:  
Körperschallanregung I.  
Körperschallanregung in den  
Kurbelwellengrundlagern eines  
Verbrennungsmotors. Vorhaben Nr. 291  
Abschlußbericht, Heft 369, 1985
- /5/ Merker, H. J.: Zusammenhang zwischen  
Zapfenkraft und Zapfenbewegung beim  
Kreislager und Kippsegmentlager.  
Fortschritt-Berichte der VDI Zeitschriften.  
Reihe 11, 1980
- /6/ Pribsch, H.-H.; Affenzeller, J.; Kuipers, G.:  
Structure Borne Noise Prediction  
Techniques. SAE 900019

# Ordnungsanalyse-Toolbox für Matlab®

Käferstein, B.

*Die Ordnungsanalyse ist ein weiterführendes Verfahren der Zeit-Frequenzanalyse an rotierenden Maschinen. Während bei einer herkömmlichen Spektralanalyse die einzelnen Fouriertransformierten in Wasserfall oder Farbkodierung über die Zeit dargestellt werden, wird bei der Ordnungsanalyse die Frequenzachse auf die aktuelle Drehzahl normiert. Damit hat man den Vorteil, dass bei steigender Drehzahl nicht die einzelnen drehzahlabhängigen Frequenzen proportional verschoben werden, sondern als konstante Vielfache der Grundschiwingung, die „Ordnungen“ im Ordnungsspektrogramm entlang der Ordinate fix bleiben.*

*The order analysis technique is an enhancement of common time-frequency-analysis methods on rotating machinery. Conventional spectral analysis plots the time dependent amplitude spectra over the measurement time in waterfall or colour coded graphs. Order analysis however performs a normalisation to the instantaneous rotational speed. This means that former speed dependent frequencies will no longer increase with angular velocity but will be straight lines parallel to the time axis, called „orders“.*

## 1 Einleitung

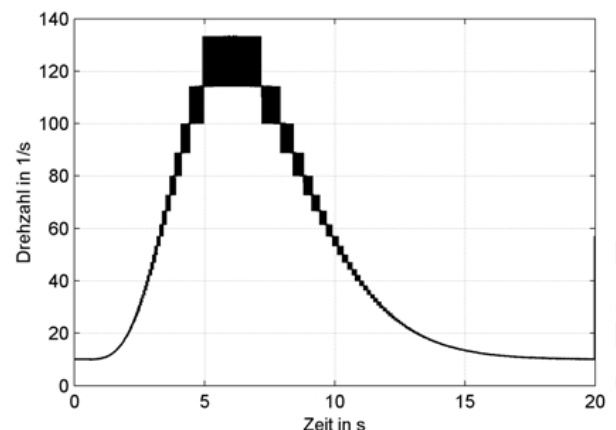
Die Ordnungsanalyse ist ein weit verbreitetes Auswerteverfahren in der Schwingungstechnik, um an Getrieben drehzahlabhängige Geräusche der Verzahnungsstufen oder Unwuchterscheinungen zu analysieren. Die übliche Darstellung als Frequenzspektrogramm ist aber bei schwankender Drehzahl ungeeignet, da dort alle Geräuschkomponenten, die direkt mit der Drehzahl zunehmen, ebenfalls in der Frequenz variieren und das zu einer Modulation führt. Eine schnelle Auswertung ist damit sehr aufwändig bzw. ganz unmöglich.

Im IMW wird zur Auswertung von Messergebnissen die Programmierumgebung Matlab mit einer breiten Anzahl von Erweiterungsbausteinen (Toolboxen) eingesetzt. Dort ist bereits eine große Anzahl von Signalverarbeitungsalgorithmen realisiert, jedoch fehlt eine Ordnungsanalyse, die im Rahmen eines Industrieprojektes am IMW in eigener Regie implementiert wurde. Nachfolgend sollen ein paar Überlegungen Ergebnisse präsentiert werden, die zum Herunterladen von der Mathworks-Website zur Verfügung stehen.

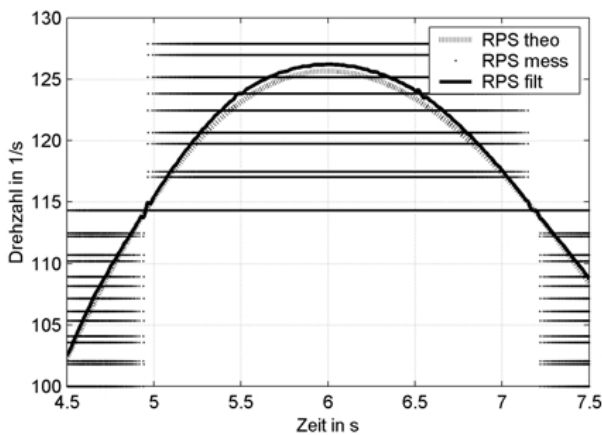
## 2 Zeit-Frequenz-Analyse

### 2.1 Vorbereitung der Messdaten

Um eine Ordnungsanalyse durchführen zu können, ist neben den eigentlichen Schwingungs- oder Luftschallsignalen auch die Drehzahl zu erfassen. Üblicherweise würde man dann einen analogen Drehzahlmesser einsetzen, der ein drehgeschwindigkeitsproportionales Spannungssignal ausgibt, wie es z.B. in älteren KFZ-Tachos üblich war. Im Zeitalter der digitalen Signalverarbeitung verwendet man jedoch Drehgeber mit Lichtschranken und Zeitmesser bzw. Frequenzzähler, die die Zeit zwischen zwei aufeinanderfolgenden Umdrehungen bestimmen und ausgeben. Da nicht jede eingesetzte Messwerterfassungshardware in der Lage ist, diese Auszählung vorzunehmen, wurde die Zählung ebenfalls in Matlab implementiert, so dass nur die ausgelösten Tastimpulse mit gemessen werden brauchen. Der Algorithmus verwendet die aktuelle Drehzahl, die für jedes Messsample als Zahlenwert vorliegen muss. Bei der Auszählung diskretisierter Signale unterliegt man in unvorteilhafter Weise dem Problem endlicher Auflösung, dh. die feste Abtastrate des Messsystems führt zu einem konstanten Fehler bei der Bestimmung der Zeitintervalle. Je höher also die Drehfrequenz ist und je kleiner die Zeitintervalle sind, desto größer wird die Ungenauigkeit bei der Drehzahlerfassung, **Bild 1**. Es kommt zu einem starken Springen der momentanen Drehzahl, so dass eine Filterung unumgänglich wird, **Bild 2**, die durch einen phasenneutralen Tiefpass in Vorwärts-Rückwärtsfiltertechnik angewendet wird. Prinzipiell ist auch eine B-Spline-Interpolation möglich, dazu müsste jedoch die Datenmenge drastisch reduziert werden, da sonst der Rechenaufwand zu groß würde.



**Bild 1:** Drehzahl über der Zeit aus dem Taktsignal extrahiert; Messunsicherheit bei hohen Drehzahlen



**Bild 2:** Drehzahlverlauf über die Zeit, vergrößerter Ausschnitt am Peak bei 5 s; Exakter theoretischer Verlauf (- - -), aus dem Signal des Drehgebers errechnetes (· · ·) und gefiltertes Signal (-)

Das zu untersuchende Signal besteht aus einer Überlagerung verschiedener drehzahlproportionaler und drehzahlunabhängiger, teilweise modulierter Komponenten und einem mittenfrequenten Rauschanteil, **Tab. 1**.

|                      |                         |
|----------------------|-------------------------|
| Feste Frequenzen Hz: | 128.3, 194.77, 370.1    |
| Ordnungen N:         | 1, 3, 5, 7, 11.2        |
| Modulationen Hz:     | 0.462, 0.159, variabel  |
| Rauschen:            | ca. 1/10 der max. Ampl. |

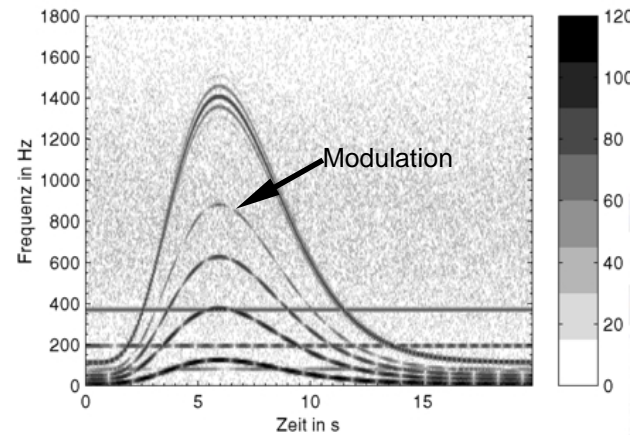
**Tab. 1:** Frequenzkomponenten im Signal

## 2.2 Analysen im Zeit-Frequenzbereich

### 2.2.1 Farbspektrogramm, Strukturanalyse

Darunter ist eine Auftragung der Spektren über eine weitere Achse- hier die Messzeit zu verstehen. Die Einzelspektren werden als Blöcke konstanter Länge berechnet und die Amplituden farblich nach ihrer Höhe gekennzeichnet. Da in der ZFA der Verlauf der Einzelfrequenzen oder der Amplituden über die Messzeit interessiert, werden viele Einzelspektren durch Verschieben des Analysefensters entlang der Zeitachse berechnet und als Farblinien aneinandergehängt, sogenannte STFA (Short-Time-Fourier-Analysis), **Bild 3**. Man befindet sich also vollständig im „Zeitbereich“, da die Rechnung sich allein auf zeitabhängige Größen bezieht. Man erhält ein Farbspektrogramm, das zeitabhängige Modulationen der Amplitude, oder Veränderungen der Frequenz deutlich hervortreten lässt. Dabei ist man jedoch einer Art „Unschärferelation“ unterworfen: je genauer man die zeitliche Auflösung haben will, z.B. bei sich stark ändernden Signalen, desto kleiner muss man die FFT-Fensterlänge, wählen, um die Dynamik nicht zu „verschmieren“. Damit wird aber die

Frequenzauflösung kleiner, da diese direkt proportional zur Fensterlänge ist.

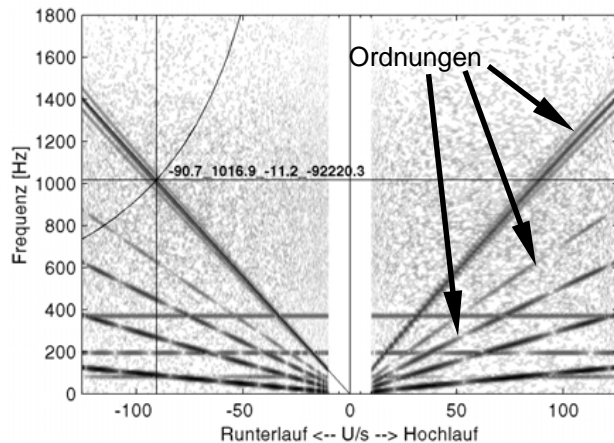


**Bild 3:** Farbspektrogramm des Signals einer rotierenden Maschine mit modulierten drehzahlabhängigen Komponenten, festen Frequenzen und Rauschen

Der Inhalt im Farbspektrogramm kann auch als Wasserfalldarstellung in isometrischer Projektion erfolgen. Diese aufgrund mangelnder Farbreister der Rechner früher oft eingesetzte Vorgehensweise ist jedoch mittlerweile eher selten anzutreffen.

### 2.2.2 Campbell-Diagramm

Das Campbell Diagramm ist dem Spektrogramm sehr ähnlich und wird oft bei Hoch- und Runterläufen von Maschinen eingesetzt, um unabhängig von der Messzeit zu werden. Als x-Koordinate wird anstatt der Messzeit die Drehzahl vorgegeben, die nur in den seltensten Fällen direkt proportional zur Messzeit ist. Denn in der Praxis ist es kaum möglich, die Drehzahl so genau zu regeln, dass man einen linearen Anstieg über die Versuchsdauer erhält. Man muss also durch Miterfassen der Drehzahl und geeignete Nachbearbeitung das Campbell Diagramm berechnen. Das geschieht, indem man die x-Achse des Farbspektrogramms (Messzeit zu jeder Spektrallinie) durch die zu jedem Zeitpunkt vorliegende Drehzahl (Bild 1) ersetzt. Da die Drehzahl von der Messzeit abhängt, wird die x-Achse des Farbspektrogramm, Bild 3, an den Stellen, wo sich die Drehzahl stark ändert gedehnt, und dort wo sie sich kaum ändert, gestaucht, **Bild 4**, z.B. bei 25-100 Umdrehungen/s.

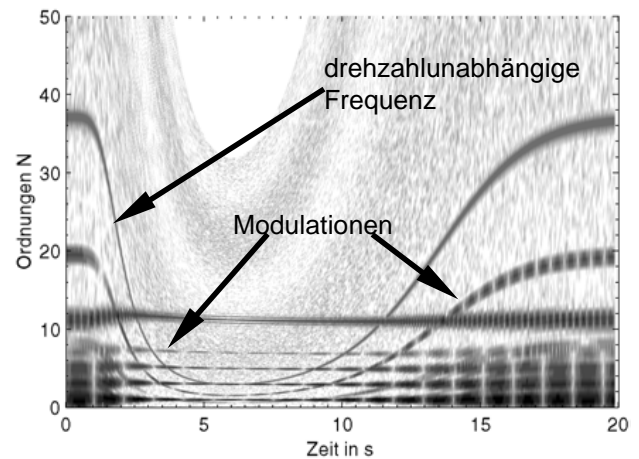


**Bild 4:** Campbell Diagramm mit Cursor

Der wellige Verlauf der drehzahlabhängigen Schwingungen über der Messzeit wird dadurch zu einer steigenden und fallenden Gerade transformiert. Die Ordnungen werden zu Mittelpunktstrahlen, die mit steigender Ordnungszahl proportional steiler verlaufen. Die festen Frequenzen bleiben jedoch als horizontale Geraden bestehen. Es ist zu beachten, dass nun die Modulation der fixen Frequenzen nicht mehr aussagekräftig ist, da der Zeitbezug verloren gegangen ist. Der hier implementierte Algorithmus sucht automatisch den Drehzahlscheitelpunkt und teilt das Diagramm in eine Runterlaufphase mit negativen Drehzahlen und Hochlaufphase mit positiven Drehzahlen ein.

### 2.2.3 Ordnungsspektrogramm im Frequenzbereich

Das Ordnungsspektrogramm, **Bild 5**, ist im Gegensatz zum „normalen“ Frequenzspektrum, Bild 3, durch Normierung der Frequenzachse auf die aktuelle Drehzahl zu erhalten. Für jedes Einzelspektrum  $S_i(t_i)$ , das bei der Messzeit  $t_i$  aufgenommen wurde, ist die Frequenzachse  $f_i$  neu zu definieren. Ist bei einem Frequenzspektrum für alle Spektren die Achse identisch und allein durch die Abtastrate und FFT-Fensterlänge vorgegeben, wir nun durch die Division durch die Drehzahl die Frequenzachse einheitenlos ( $\text{Hz}/(1/\text{s})=1$ ) und zur Ordnungsachse transformiert. Am Beispiel einer Unwucht sei die Vorgehensweise erläutert: bei einer Umdrehung pro Sekunde erzeugt die Unwucht eine Schwingung mit der Frequenz 1 Hz, also immer mit der Umdrehungszahl (gemessen in U/s) – bei der zehnfachen Drehzahl entsprechend bei 10 Hz usw. Teilt man diese Frequenzachse nun durch die Drehzahl erhält man unabhängig von der Messzeit eine horizontale Linie bei der Ordnung 1. Alle anderen, fixen Frequenzwerte werden dadurch jedoch ebenfalls skaliert und bilden Kurven, deren horizontaler Verlauf zum Kehrwert der Drehzahl proportional ist.



**Bild 5:** Ordnungsspektrogramm durch Normierung der Frequenzachse aus dem Spektrogramm berechnet

In Bild 5 erkennt man sehr deutlich die aufgeprägte Amplitudenmodulation der Ordnungen und der fixen Frequenzen. Es fällt aber auch auf, dass bei kleinen Drehzahlen am Anfang und am Ende des Diagramms die Ordnungslinien sehr breit und verwaschen werden. Das liegt daran, dass mit einer festen Zeitauflösung abgetastet wurde. Bei kleinen Drehzahlen können dann die Ordnungen nur schlecht aufgelöst werden, da entsprechend auch die fixe Frequenzauflösung durch die Division weiter vergrößert wird. Um diesen Nachteil zu umgehen, verwendet man eine Ordnungsanalyse im Winkelbereich.

## 2.3 Analysen im Zeit-Winkelbereich

### 2.3.1 Ordnungsspektrogramm im Winkelbereich

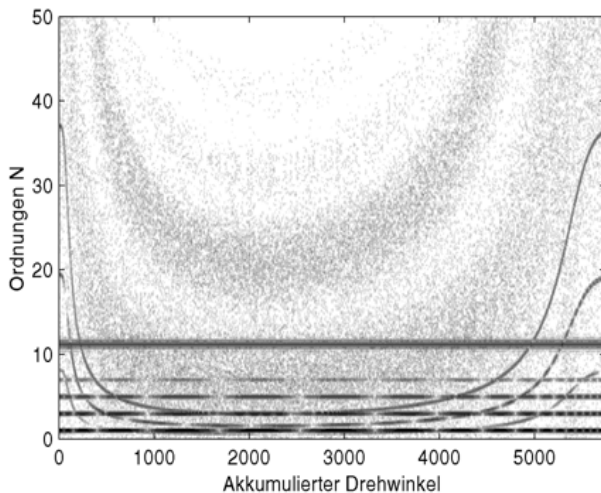
Eine recht einfach und simple Methode, um aus dem aufgezeichneten Signal ein Ordnungsspektrogramm zu erhalten ist, eine FFT über das Signal durchzuführen, wenn anstelle der Zeit als x-Achse für das Signal der insgesamt zurückgelegte Drehwinkel angegeben wird. Dieser seit Start der Messung „akkumulierte Drehwinkel“ ist einfach über die Integration des Drehzahlsignals nach der Zeit zu erhalten oder Aufsummieren der Taktimpulse:

$$\varphi(t) = 2\pi \int_{\tau=0}^{\tau=t} f(\tau) \tau \quad \text{bzw.} \quad \varphi(t_i) = \frac{2\pi}{F_s} \sum_{k=1}^{k=i} f_k \quad \text{Gl. 2.1}$$

In der Verarbeitung diskreter Signale ist  $F_s$  die Abtastfrequenz und  $f$  die Drehfrequenz (Drehzahl) in 1/s. Das bedeutet aber, dass bei nicht konstanter Winkelgeschwindigkeit und äquidistanter Abtastung im Zeitbereich diese neue Winkelachse nicht mehr äquidistant ist. Damit ist die Berechnung der FFT, die nur für äquidistant abgetastete Signale gültig ist, hinfällig. Um dieses Problem zu lösen, tastet man das Signal, das mit *konstant unterteilter Zeitachse*, aber *ungleichmäßig unterteilter Drehwinkelachse* gemessen wurde, in ein Signal mit *konstanter*

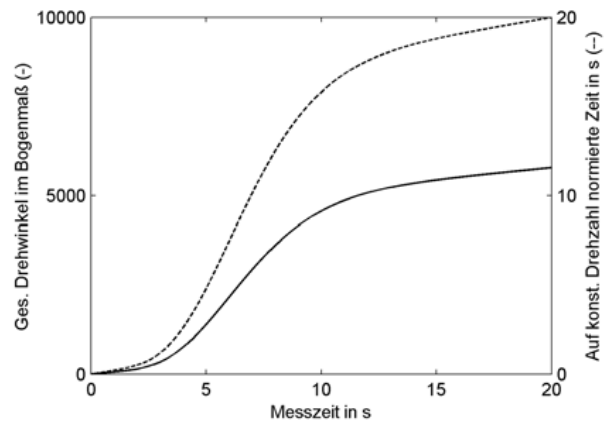
*Drehwinkelteilung* um. Als Randbedingung wird eine ausreichend große Zahl an Samples vorgegeben, um Unterabtastung zu vermeiden und der Start und Endpunkt, bei dem beide zusammenfallen müssen. In Matlab verwendet man die Interpolationsfunktion `interp1`, die zur Wahrung der Signalhöhe auch einen quadratischen Ansatz anbietet. Man erhält damit eine Transformation der Zeitachse des Messsystems auf die Drehwinkelachse des Messobjekts.

Die STFA als Farbspektrogramm ist dann ein Ordnungsspektrogramm, bei dem einfach die Messzeit durch den Drehwinkel substituiert wurde, Bild 6. Man erkennt sofort den Unterschied zum Ordnungsspektrogramm, das aus den Spektrogramm des Zeitsignals gewonnen wurde, Bild 5: Die Ordnungen sind deutlich schärfer über den gesamten Messbereich, jedoch sind die fixen Frequenzen zeitlich gedehnt und gestaucht (an der Modulation erkennbar). Es ist oft sinnvoll, den Verlauf der Ordnungen einer konkreten Messzeit zuzuordnen, wo z.B. bestimmte Schalttereignisse an einem Getriebe stattgefunden haben.



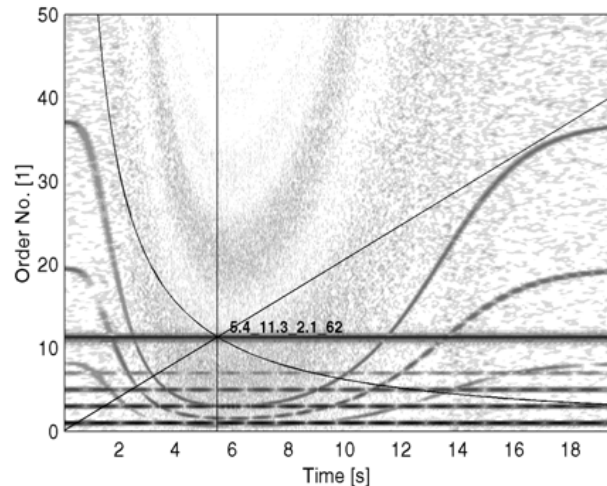
**Bild 6:** Ordnungsspektrogramm durch Analyse im Winkelbereich berechnet, Ursprungsform

Aus diesem Grund ist eine weitere Interpolation der Drehwinkelachse auf eine konstante Zeitachse vorzunehmen; das berechnete Ordnungsspektrum bleibt dabei selbst unberührt. Folgende Überlegung ist dafür anzustellen: an Stellen bei hohen Drehzahlen nimmt der Winkel  $\varphi$  bei gleicher Zeit schneller zu als bei langsamen Drehzahlen. Oder anders: die Zeit müsste an diesen Stellen gestaucht werden, um diesen schnellen Vorlauf zu kompensieren. Der gemeinsame Endpunkt bleibt jedoch genau wie beim akkumulierten Drehwinkel bestehen: wenn die Messung gestoppt wird, muss diese auf den Drehwinkel normierte Zeit gleich mit der Messzeit sein. Bild 7 zeigt den Sachverhalt für den Drehwinkel und die normierte Zeit graphisch. Dort, wo der Drehwinkel stark zunimmt (4-10s) verläuft auch die Zeit schneller.



**Bild 7:** Akkumulierter Drehwinkel (durchgezogen) und normierte Zeit (gestrichelt) über der Messzeit aufgetragen

Arbeitet man diesen Zusammenhang in die Daten aus Bild 6 ein, so erhält man ein zu Bild 5 inhaltlich identisches **Bild 8**, das jedoch im Detail abweicht und bessere Ergebnisse liefert. Das liegt mithin auch daran, dass jetzt Frequenzänderungen des Signals innerhalb eines FFT-Fensters nicht zu Sprüngen bzw. Stufen in den Kurven führen, sondern durch die Berechnung im Winkelbereich eliminiert worden sind. Man darf jedoch nicht vergessen, dass auch einige Nachteile durch die Umtastung entstehen: Das Abtasttheorem muss erfüllt werden, es ist mehr Rechenzeit erforderlich und durch die Interpolation geht ein gewisser Teil der Signalenergie verloren.

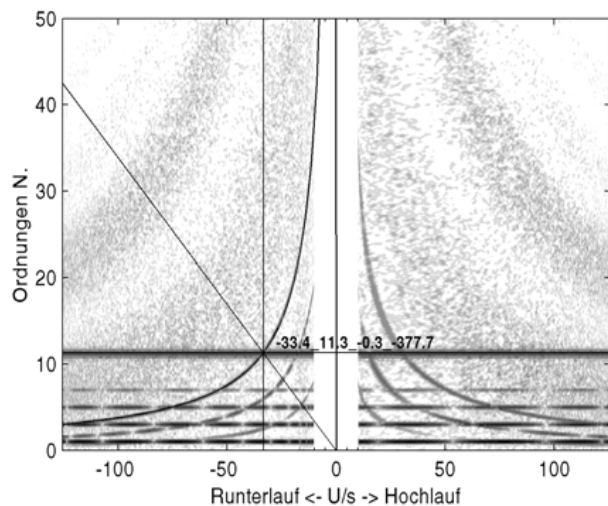


**Bild 8:** Ordnungsspektrogramm durch Analyse im Winkelbereich berechnet. Zeitachse durch Interpolation berechnet

### 2.3.2 Ordnungs-Campbell-Diagramm

Eine weitere Darstellung kann nun abgeleitet werden: durch Umwandlung der Zeitachse in Bild 8 in eine Drehzahlachse analog Bild 4 erhält man ein Campbell-Diagramm der Ordnungen als horizontale Linien, **Bild 9**. Die konstanten Frequenzen werden hier zu Hyperbeln und es geht wieder der Bezug der Einzelkurven zur absoluten Messzeit verloren.



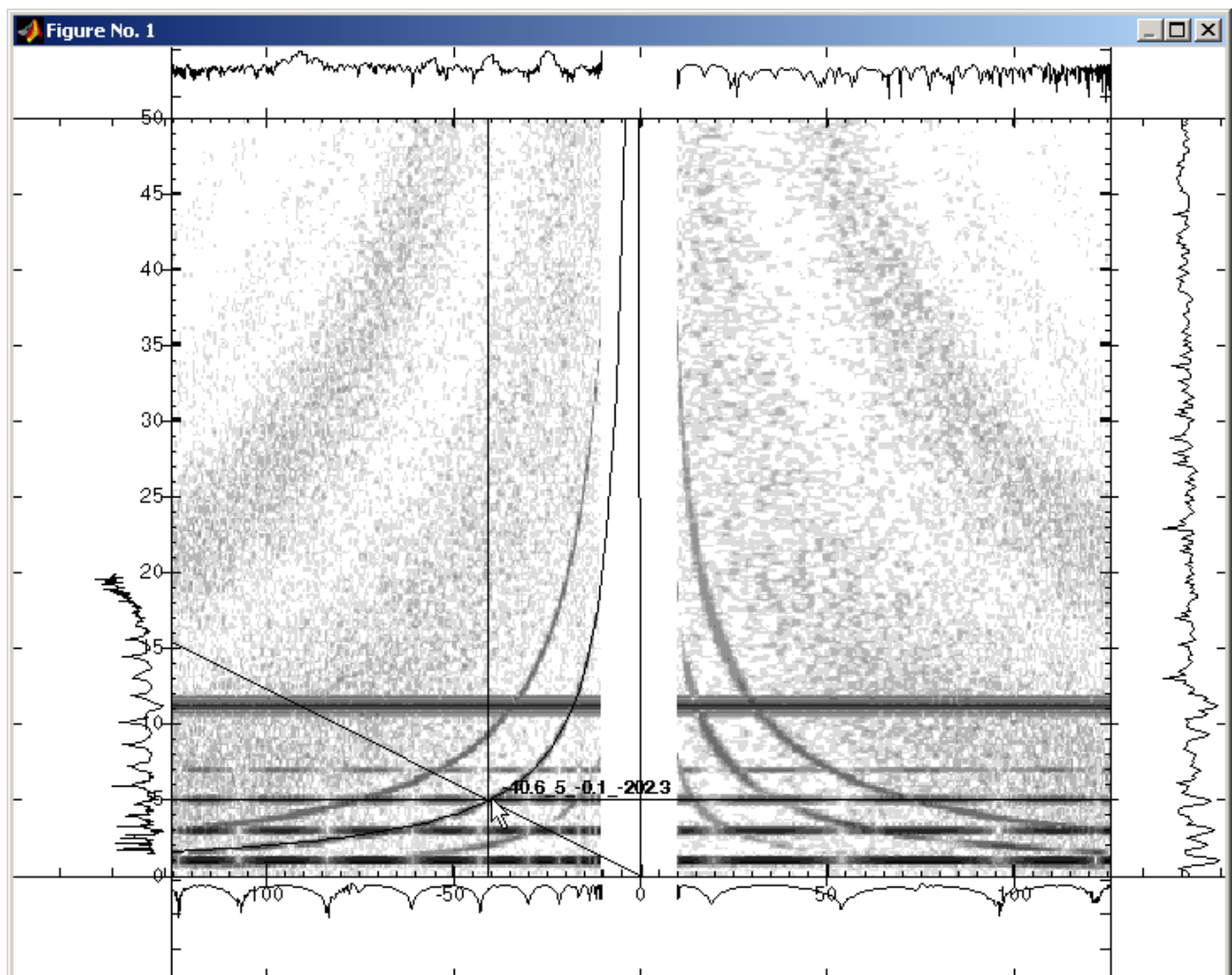


**Bild 9:** Ordnungs-Campbell-Diagramm, abgeleitet aus Daten in Bild 8 und Bild 1

Der Vorteil gegenüber dem Campbell-Diagramm der Frequenzdaten ist, dass man leichter die parallel verlaufenden Ordnungen auswerten kann, und deren Detailschärfe stärker hervortritt. Mit Hilfe der eingebauten Cursor-Funktion, s.u., kann man sich Schnitte entlang der einzelnen Kurven durch den aktuellen Diagrammpunkt anzeigen lassen.

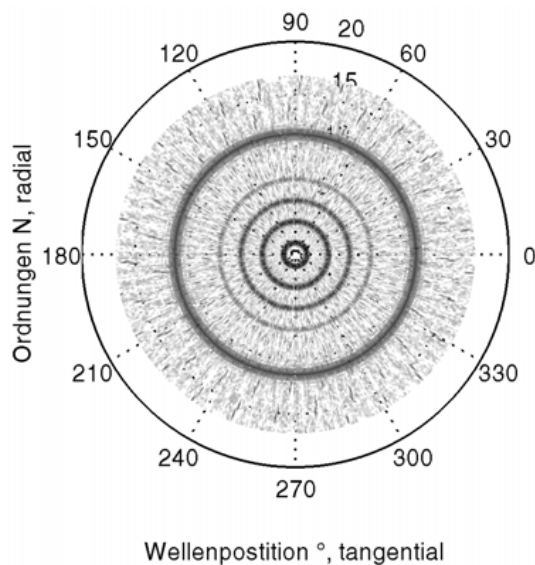
### 2.3.3 Polarplot/Irisplot der Ordnungen über die Winkelstellung der Welle

Dieses Diagramm ist sinnvoll, wenn man vermutet, dass der Verlauf des Schwingensignals zu unterschiedlichen Amplituden innerhalb der Ordnungen führt, weil eine Modulation vorliegt. Das könnte z.B. der Fall sein, wenn man ein Zahnrad mit 11 Zähnen hat. Als Ordnungssignal erhält man durch die veränderliche Steifigkeit während des Eingriffs, die Ordnung 11, und durch Sprungüberdeckung weitere Verstärkungen der Ordnungen 22, 33, 44 etc. die in der Höhe lastabhängig sind. Bei Teilungsfehlern, die sich nicht gleichmäßig auf dem Zahnrad verteilen, erhält man eine Modulation über die Winkelstellung und zusätzliche höhere und niedrigere Ordnungen als 11 (z.B. 3/11, 8/11 etc.). Diese Modulation wäre dann sichtbar, wenn man die Amplituden in einem Bereich von  $0^\circ$  bis  $360^\circ$  der Wellenstellung auftrüge und dann den entsprechenden Zähnen zuordnen würde, **Bild 11**. Als Winkelreferenz dient der akkumulierte Drehwinkel, der durch die Berechnung mit Modulo  $2\pi$  in den Bereich von  $0^\circ \dots 360^\circ$  gespiegelt wird. Durch Sortierung der Einzelspektren nach dem Winkel und Darstellung im Polarkoordinatensystem erhält man die Graphik



**Bild 10:** Interaktiver Cursor mit Slices und markierter Cursorposition, beispielhaft im Ordnungs-Campbell-Diagramm dargestellt

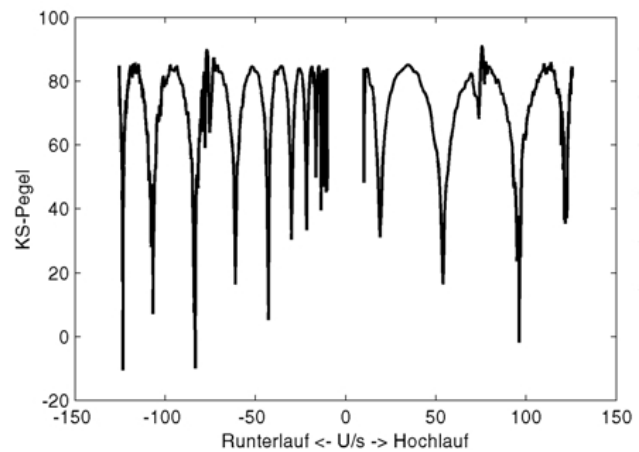
nach **Bild 11**. Prinzipiell besteht auch die Möglichkeit, eine größere Winkelauflösung vorzugeben und die Spektren in diesen Sektoren zu mitteln oder anstatt der Polardarstellung die konventionelle xy-Darstellung zu wählen.



**Bild 11:** Ordnungen über die Winkelstellung der Welle aufgetragen, berechnet aus Bild 6

### 2.3.4 Order Tracking Diagramm

Ein Order-Tracking wird üblicherweise durchgeführt, in dem man Schmalbandfilter mit drehzahlabhängiger Mittenfrequenz während des Hochlaufs mit dem Spektrum mitlaufen lässt. Hier kann man jedoch aus dem Ordnungs-Campbell-Diagramm, **Bild 11**, durch Analyse der eingezeichneten Schnittlinien bei konstanter Ordnungsachse den drehzahlabhängigen Verlauf einer Ordnung ermitteln, Bild 12.



**Bild 12:** Ordnungsverlauf über der Drehzahl (Order-Tracking-Diagramm), die zeitliche Modulation führt zu variablen Amplituden

### 2.3.5 Interaktiver Cursor

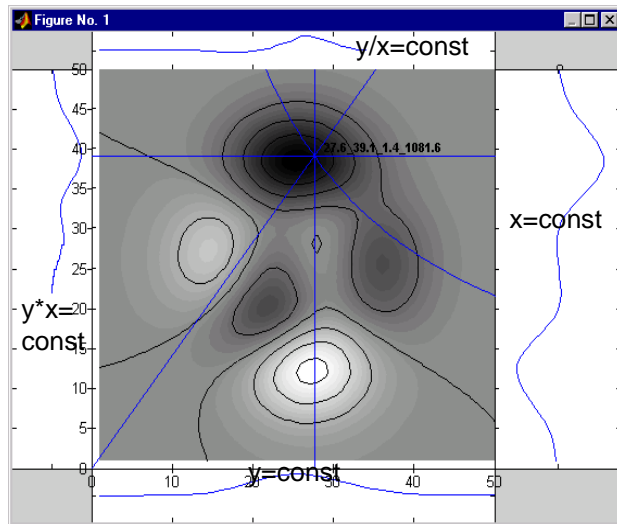
Um für den Praktiker eine einfache und schnelle Auswertung anhand der graphischen Daten zu ermöglichen, wurde eine spezielle Unterfunktion programmiert, die auf ein beliebiges Diagramm mit 3D-Daten angewendet werden kann. Damit kann man interaktiv die Daten direkt aus den im Hintergrund abgespeicherten Werten präzise auslesen und Cursormarken setzen. Wenn man während des Auswahlprozesses die Maus bewegt, werden die aktuellen Ortskoordinaten und Parameter der Schnittlinien angezeigt und ausserhalb der eigentlichen Graphik als Schnittlinien dargestellt, Bild 11.

Die Bedeutung der einzelnen Graphen ist in Tab. 1 näher aufgeschlüsselt. Durch Drücken der ESCAPE Taste kann der Benutzer die Daten übergeben, ohne den Cursor einzuzeichnen. Für eine genaue Positionierung kann zusätzlich die Tastatur eingesetzt werden, die jeweils um einen Pixel die Maus weiterverschiebt.

Zur Verdeutlichung ist **Bild 13** angeführt, das die einzelnen Schnitte durch eine Höhenkarte mit wenigen lokalen Maxima und Minima darstellt. Die absolute Höhe ist direkt proportional zum der Grad der Schwärzung.

| Position | Parameter   | Bedeutung  |
|----------|---|--|
| rechts   | Vertikale mit $x = \text{const} = -40.6 \text{ U/s}$                            | Ordnungsspektrum bei konstanter Drehzahl                                   |
| unten    | Horizontale mit $y = \text{const} = 5.0 \text{ Ordnungen}$                      | Verlauf der Ordnung 5.0 über der Drehzahl, sog. „Order-Tracking“           |
| oben     | Ursprungsgerade mit $y/x = \text{const} = -0.1 \text{ Ordnungen/(Umdrehung/s)}$ | Hier keine, im Campbell Diagramm ist das die Linie konstanter Ordnungszahl |
| links    | Hyperbel mit $x*y = -202.3 \text{ Ordnungen*Umdrehungen/s}$                     | Verlauf der fixen, drehzahlunabhängigen Frequenzen über der Drehzahl       |

**Tab. 2:** Bedeutung der Schnittlinien und Cursordaten im Ordnungs-Campbell-Diagramm in Bild 11



**Bild 13:** Interaktiver Cursor mit automatisch errechneten Schnittlinien durch die Datenfläche

### 3 Zusammenfassung

Es wurde eine Toolbox für das numerische Rechenprogramm Matlab entwickelt, die eine Ordnungsanalyse im Frequenzbereich und im Winkelbereich zur Verfügung stellt. Anhand eines Messsignals wurden die verschiedenen Anwendungsmöglichkeiten aufgezeigt und die aus den Diagrammen abzulesenden Daten diskutiert. Die Toolbox ist vom Filebereich der Firma „The Mathworks“, dem Hersteller von Matlab, kostenlos downzuladen.

### 4 Literatur

- /1/ Online-Hilfe zu Matlab: im Internet unter:  
<http://www.mathworks.com/access/helpdesk/help/helpdesk.shtml>
- /2/ Download unter :  
<http://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/Files.jsp?type=category&id=&fileId=2251>

## Schwingungsverhalten von „Interlocked Elements“

Käferstein, B.; Sover, A.

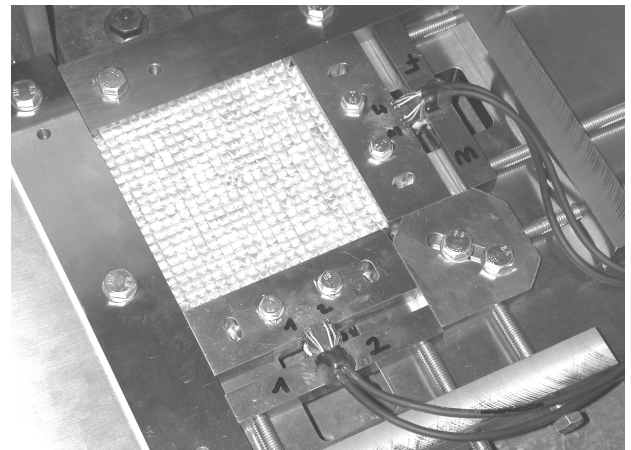
Das Institut für Werkstoffkunde und Werkstofftechnik entwickelt unter der Leitung von Prof. Dr. rer. nat. habil. Juri Estrin sogenannte „Interlocked Elements“, makroskopische Körper mit besonderer geometrischer Gestalt. Bei geeigneter Anordnung und einer Fixierung am Rand sind sie ohne Klebstoffeinsatz in der Lage, eine steife Struktur zu bilden, z.B. eine Platte aus Tetraedern, die besondere Eigenschaften hinsichtlich Festigkeit, Fehlstellentoleranz, Steifigkeit usw. hat. Das IMW kooperiert auf diesem Gebiet mit dem IWW und hat die dynamischen Eigenschaften dieser Elemente untersucht.

The Institute for Material Science and Technology headed by Prof. Dr. rer. Nat. habil. Juri Estrin develops „Interlocked Elements“ which are small macroscopic bodies with a specific shape and structure. Arranged in a certain manner and fixed at the outer boundaries these elements are capable of forming stiff structures without any glue. An example is a plate made of tetrahedrons, which has a new kind of features regarding fatigue, failure resistance stiffness etc. The IMW cooperates with the IWW and investigated the dynamic behaviour of such structures.

### 1 Einleitung

Interlocked Elements (ILE) halten ohne weiteren Klebstoff allein aufgrund des Formschlusses untereinander zusammen! Sie bilden eine Struktur aus diskreten Einzelementen, die sehr spezielle Eigenschaften haben [1]. Um einen qualitative Aussage über das Schwingungsverhalten machen zu können, wurde aus solchen Einzelementen eine Platte zusammengesetzt, am Rand mit unterschiedlicher Vorspannung fixiert und in der

Mitte durch einen Shaker kraftgesteuert angeregt, **Bild 1** und **Bild 2**. Messungen der Übertragungsfunktionen wurden anhand von Sinus-Sweeps unterschiedlicher Kraftamplitude und einem selbst aufgebauten Laser-Scanning-Vibrometer (s. Artikel in dieser Mitteilung) mit Rauschanregung vorgenommen. Die Eigenfrequenzen mit Dämpfungswerten wurden mit einem Modalanalysepaket (SDTools) extrahiert. Dabei wurden abweichend von der üblichen Vorgehensweise alle Resonanzen getrennt (lokale Optimierung) behandelt, wodurch eine bessere Aussagekraft hinsichtlich der Dämpfung erreicht werden konnte, **Bild 3**. Zudem wurde der Einfluss verschiedener axialer Vorspannkräfte untersucht. Mit Hilfe variabel einstellbarer Klemmschlitten mit DMS-Applikation wurden Kraft und Kippmoment überwacht, **Tab. 1**. Bei den Sweeps wurden auf der Rückseite der Platte einzelne Tetraeder an freien Flächen der Struktur festgeklebt und die lateralen Beschleunigungen gemessen.



**Bild 1:** In der Kraft einstellbare Messeinspannung der Platte aus ca. 500

| Nr. | Name      | Nennkraft [kN] |    | Amplitude [dB] | Lokal Frequenz [Hz] |                |                | Lokal Dämpfung |                |                | Global Frequenz [Hz] |                |                | Global Dämpfung x10 <sup>3</sup> |                |                |
|-----|-----------|----------------|----|----------------|---------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------------|----------------|----------------|----------------------------------|----------------|----------------|
|     |           | x              | y  |                | f <sub>1</sub>      | f <sub>2</sub> | f <sub>3</sub> | d <sub>1</sub> | d <sub>2</sub> | d <sub>3</sub> | f <sub>1</sub>       | f <sub>2</sub> | f <sub>3</sub> | d <sub>1</sub>                   | d <sub>2</sub> | d <sub>3</sub> |
| 1   | ILocks_1  | 10             | 10 | 0              | 1326                | 3796           | 4998           | 0,0218         | 0,014          | 0,064          | 1327                 | 3784           | 5022           | 0,0154                           | 0,0046         | 0,0045         |
| 2   | ILocks_2  | 10             | 10 | 0              | 1327                | -----          | 4923           | 0,0218         | -----          | 0,125          | 1328                 | 3259           | 4363           | 0,0141                           | 0,0024         | 0,0008         |
| 3   | ILocks_3  | 10             | 10 | -9             | 1328                | 3809           | 5030           | 0,0253         | 0,016          | 0,057          | 1329                 | 3802           | 5026           | 0,0191                           | 0,0054         | 0,0041         |
| 4   | ILocks_4  | 10             | 10 | -3             | 1327                | 3801           | 5003           | 0,0246         | 0,015          | 0,066          | 1328                 | 3798           | 5023           | 0,0184                           | 0,0043         | 0,005          |
| 5   | ILocks_5  | 10             | 10 | -6             | 1328                | 3804           | 4999           | 0,025          | 0,016          | 0,07           | 1329                 | 3813           | 5019           | 0,0195                           | 0,0052         | 0,0057         |
| 6   | ILocks_6  | 5              | 10 | -6             | 1314                | 3711           | 4826           | 0,0191         | 0,015          | 0,073          | 1316                 | 3717           | 5070           | 0,0157                           | 0,007          | 0,0028         |
| 7   | ILocks_7  | 5              | 10 | 0              | 1314                | 3709           | 4842           | 0,018          | 0,015          | 0,069          | 1316                 | 3707           | 5058           | 0,014                            | 0,0057         | 0,002          |
| 8   | ILocks_8  | 5              | 5  | 0              | 1249                | 3436           | 4417           | 0,0234         | 0,024          | 0,075          | 1249                 | 3402           | 4591           | 0,022                            | 0,0074         | 0,0097         |
| 9   | ILocks_9  | 5              | 5  | -6             | 1250                | 3447           | 4404           | 0,0226         | 0,024          | 0,077          | 1250                 | 3526           | 4585           | 0,0213                           | 0,0084         | 0,0086         |
| 10  | ILocks_10 | 1              | 1  | -6             | 989                 | 2643           | 3552           | 0,0186         | 0,021          | 0,046          | 990                  | 2641           | 3550           | 0,0165                           | 0,0082         | 0,0032         |
| 11  | ILocks_11 | 1              | 1  | 0              | 983                 | 2631           | 3513           | 0,0177         | 0,024          | 0,052          | 983                  | 2636           | 5534           | 0,0156                           | 0,0106         | 0,0048         |
| 12  | Plate_1   | 10             | 10 | 0              | 1696                | 1682           | 7405           | 0,0956         | 0,12           | 0,028          | 1727                 | 2045           | 7391           | 0,0606                           | 0,0085         | 0,0051         |
| 13  | Plate_1f  | 10             | 10 | 0              | 1896                | 7260           | 7287           | 0,0138         | 0,054          | 0,046          | 1896                 | 6831           | 7460           | 0,0135                           | 0,004          | 0,0106         |
| 14  | Plate_2   | 10             | 10 | -6             | 1699                | 2072           | 7425           | 0,0846         | 0,063          | 0,03           | 1722                 | 2052           | 7448           | 0,0614                           | 0,0074         | 0,0043         |
| 15  | Plate_2f  | 10             | 10 | -6             | 1900                | 7230           | 7271           | 0,0142         | 0,074          | 0,052          | 1902                 | 6237           | 6842           | 0,0137                           | 0,0233         | 0,0197         |
| 16  | Plate_3   | 1              | 1  | -6             | 1242                | 3192           | 5184           | 0,0166         | 0,019          | 0,036          | 1242                 | 3211           | 5150           | 0,0147                           | 0,0112         | 0,0034         |
| 17  | Plate_3f  | 1              | 1  | -6             | 1234                | 3108           | 5141           | 0,0222         | 0,026          | 0,131          | 1234                 | 3119           | 5474           | 0,0203                           | 0,0093         | 0,007          |

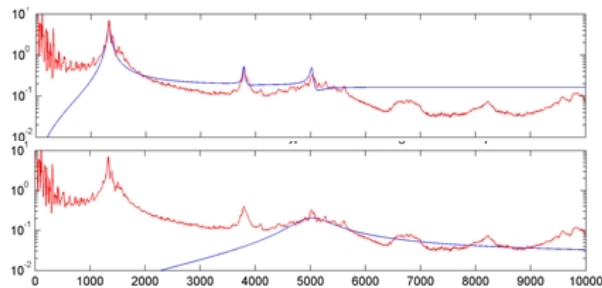
**Tab. 1:** Auswerteergebnisse (Endung „f“ = Einspannung extra fest geklemmt) für die 2 Analyseverfahren

zusammengesetzten Einzeltetraedern mit DMS

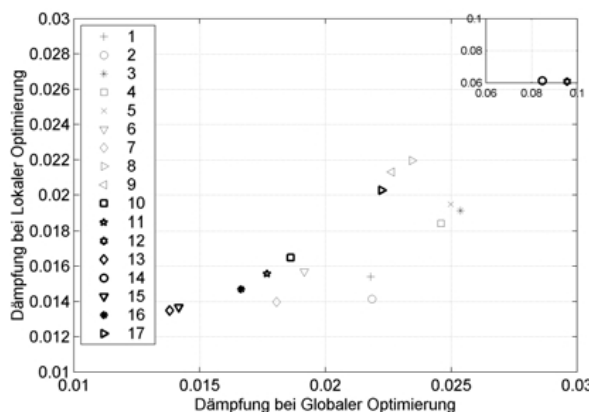


**Bild 2:** Aufbau: Klemmvorrichtung mit Shaker, Schubstange, Verstärkern und Kraftsensor

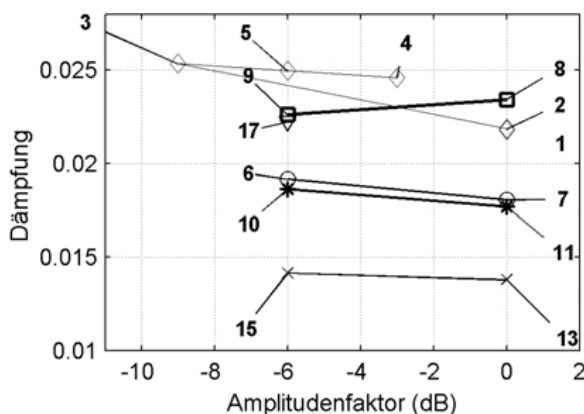
## 2 Ergebnisse



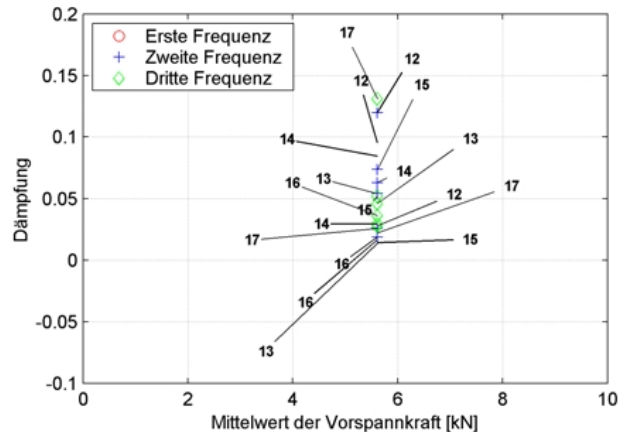
**Bild 3:** Globale (o.) und lokale Optimierung (u.) des Curve-Fits zeigen Abweichungen



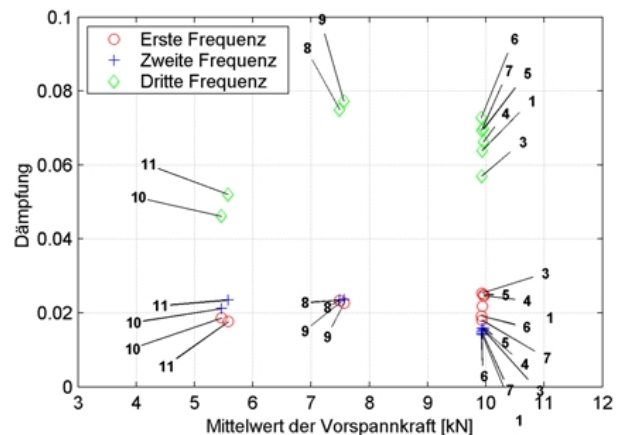
**Bild 4:** Dämpfungswerte für die Auswertemethoden



**Bild 5:** Dämpfung ist keine Funktion der Anregungsamplitude (Rauschanregung)



**Bild 6:** Dämpfung als Funktion der axialen Vorspannung für eine Vollplatte aus gleichem Werkstoff (Al) mit zu den IELs äquivalentem Masse/Fläche-Kennwert



**Bild 7:** Dämpfung als Funktion der Vorspannung für Interlocked Elements

## 3 Zusammenfassung

Eine besonders hohe Dämpfung von ILE's gegenüber einer Vollplatte kann entgegen den Erwartungen nicht nachgewiesen werden. Die Dämpfung ist jedoch kaum eine Funktion der Amplitude, **Bild 5**, so dass man ein weitgehend lineares Schwingungsverhalten vermuten kann. Die 1,4-fach höhere Frequenz der Aluplatte lässt eine 1,2-fach kleinere dynamische Steifigkeit der IELs bei gleicher Masse vermuten. Dennoch ergibt sich zumindest ein kleiner Vorteil, da die mittlere Dämpfung der IELs (21.6%) zu der Platte (16.7%) ca. 1.3 x höher ist. Für weitere Untersuchungen ist zu prüfen, inwieweit die Toleranz der Tetraeder für Reibphänomene genutzt werden kann. In diesem Fall läge nicht mehr ein reiner Formschluss, sondern eine Mischform mit Reibschluss vor.

## 4 Literatur

- /1/ Estrin, J.: Bauen ohne Mörtel. Materialarchitektur eröffnet neue Werkstoffpaarungen und -eigenschaften. TU-Contact Nr. 9, TU-Clausthal, 2001. Link:

<http://www.tu-clausthal.de/presse/tucontact/2001/Dezember/tuc1/08b.pdf>



# Inverse Messung von Kräften in akustisch relevanten Frequenzbereich

Backhaus, S.

*In der Akustik sowie in anderen technischen Anwendungen tritt häufig das Problem auf, dass Kräfte gemessen werden müssen, der Kraftfluss aber nicht durch einen Kraftsensor unterbrochen werden darf. Der folgende Artikel stellt ein Verfahren vor, wie diese Einschränkung umgangen werden kann.*

*During structure borne sound measurements and other technical tasks there is often a problem to measure forces without weakening the structure by inserting a force sensor. This article shows a way to avoid such problems.*

## 1 Problemstellung

In vielen technischen Anwendungsfällen, insbesondere im Bereich der akustischen Messtechnik kommt es häufig zu Anwendungen bei denen dynamische Kräfte gemessen werden müssen. Leider ist es bei einigen Anwendungen nicht möglich einen Kraftsensor im direkten Kraftfluss unterzubringen, da es durch dessen Anbringung zu einer Schwächung der Umgebung kommen würde.

Vor allem aus der Betriebsfestigkeit ist ein Verfahren zur indirekten Bestimmung von Kräften bekannt, die Dehnungsmessung mittels Dehnungsmesstreifen (DMS). Mit DMS lässt sich die Dehnung ( $\epsilon$ ) an der Oberfläche eines Bauteils messtechnisch bestimmen. Mit Hilfe des Elastizitätsmoduls ( $E$ ) des eingesetzten Materials lassen sich anhand des Hooke'schen Gesetzes die im Bauteil auftretenden Spannungen ( $\sigma$ ) berechnen.

$$\sigma = E\epsilon$$

Unter Verwendung der beanspruchten Fläche ( $A$ ) lässt sich daraus auf die im Bauteil herrschenden Kräfte ( $F$ ) schließen.

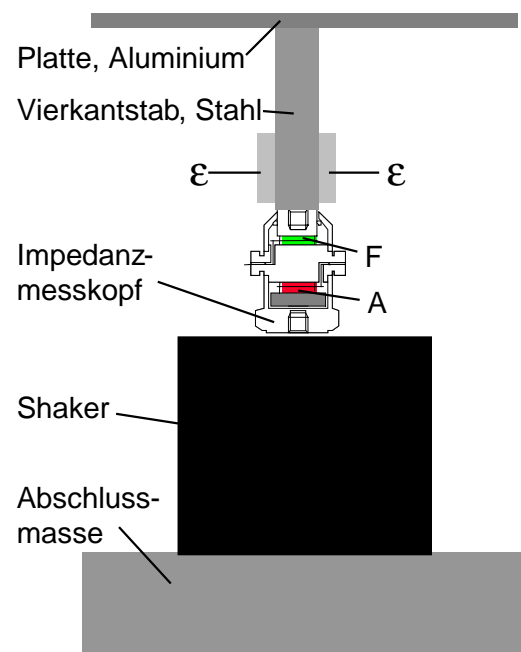
$$\sigma = \frac{F}{A}$$

Die in der Betriebsfestigkeit eingesetzten DMS sind allerdings nur für Schwingungen mit wenigen tausend Hertz brauchbar. Erst neuere

Entwicklungen aus der Messtechnik haben Sensoren geliefert, die für Messungen im akustisch relevanten Frequenzbereich geeignet sind. Diese Dehnmesselemente beruhen auf dem in der Schwingungsmesstechnik häufig verwendeten piezoelektrischen Messprinzip, welches Schwingungsmessungen, im Fall der Dehnungssensoren, theoretisch bis zu 100 kHz zulassen.

## 2 Messtechnischer Versuchsaufbau

Bevor im Kraftfluss liegende Kraftsensoren durch an der Oberfläche applizierte Dehnungssensoren



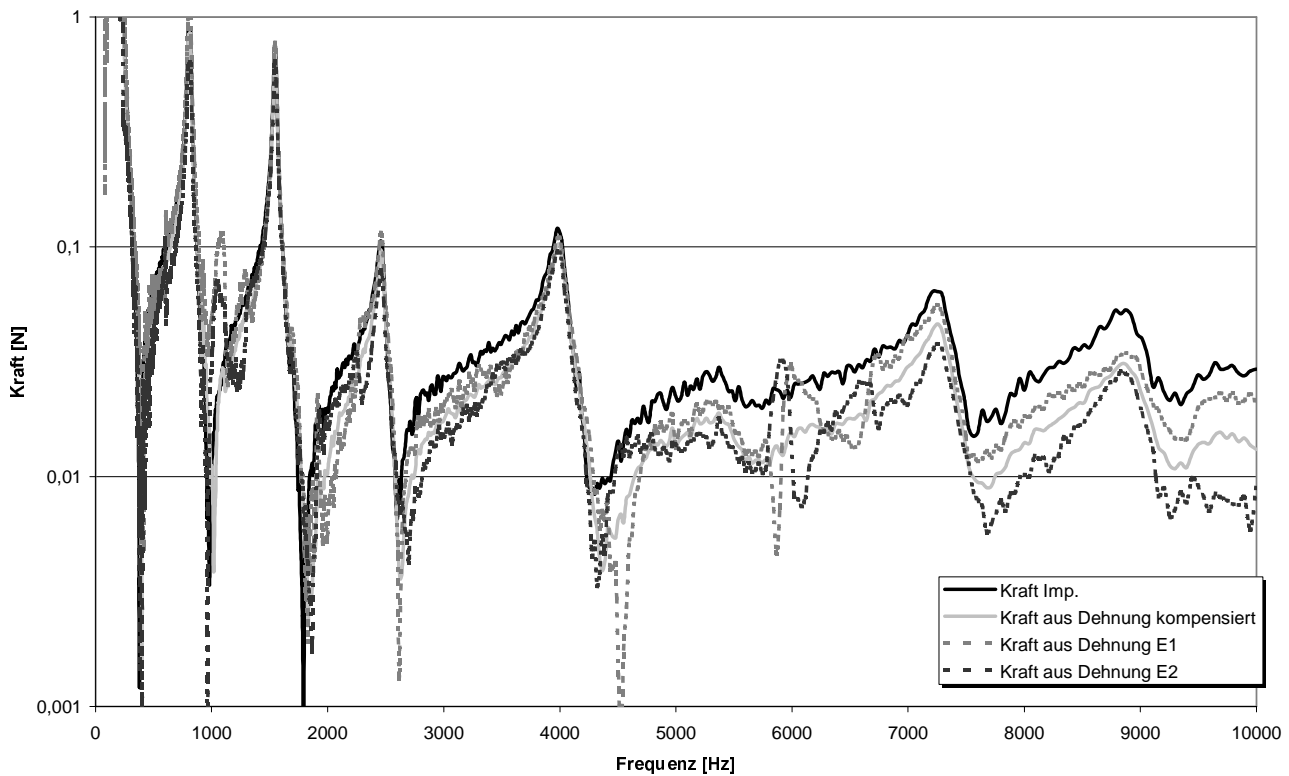
ersetzt werden sollen, wurden Versuche durchgeführt, um die Übertragbarkeit der Ergebnisse zu prüfen.

In Bild 1 ist der Versuchsaufbau dargestellt.

**Bild 1:** Versuchsaufbau

Mittels eines elektrodynamischen Schwingerregers (Shaker) wird über einen Impedanzmesskopf, der in diesem Fall als Kraftsensor dient, ein Vierkantstab aus Stahl sowie eine Aluminiumplatte angeregt. Der Kraftsensor innerhalb des Impedanzmesskopfes dient als Referenz. Mit  $\epsilon$  sind die Dehnungssensoren gekennzeichnet, die für die Messung links und rechts an der Oberfläche des Stahlstabes in Richtung des Kraftflusses angebracht sind. Die Aluminiumplatte dient als





**Bild 2:** Spektrum der Kraft über der Frequenz

Abschlussmasse um der Anregung durch den Shaker einen Widerstand entgegen zu setzen.

Als Anregungssignal wurde ein Sinussweep zwischen 50 und 10000 Hz verwendet.

**Bild 2** zeigt das Amplitudenspektrum der Kraft über der Frequenz. Dabei gilt zu beachten, dass die Achse der Kraft logarithmisch aufgetragen ist. Wie in der Grafik gut zu erkennen ist, stimmen die Messwerte des Kraftsensors und die der Dehnungssensoren E 1 und E 2 bis etwa 4000 Hz gut überein. Oberhalb dieser Frequenz beginnen die Kurven auseinander zu driften. Weiterhin zeigen sich bei ca. 4500 sowie bei 6000 Hz starke Abweichungen innerhalb der Verläufe der Dehnungssensoren gegenüber der Messwerte des Kraftsensors. Diese Ausreißer sind mit Biegeeffekten des Stabes zu erklären, wobei ein Dehnungssensor gestaucht und ein anderer gestreckt wird. Sind beide Sensoren gegenüberliegend jeweils im gleichen Abstand von der neutralen Faser des Stabes angebracht, lässt sich dieser Einfluss durch phasenrichtige Addition der Signale im Frequenzbereich nach folgender Formel kompensieren.

$$A = \sqrt{A_1^2 + A_2^2 + 2A_1A_2 \cos(\phi_1 - \phi_2)}$$

$$\Phi = \arctan\left(\frac{A_1 \sin(\phi_1) + A_2 \sin(\phi_2)}{A_1 \cos(\phi_1) + A_2 \cos(\phi_2)}\right)$$

Dabei gibt A die Amplitude des jeweiligen Signals,  $\Phi$  die Phase an.

Das nach obiger Gleichung kompensierte Signal ist, wie in **Bild 2** von Biegeeinflüssen befreit. Was bleibt, ist die Drift des Signals bei höheren Frequenzen. Diese Erscheinung ist auf die Masse- und Federeigenschaften des Stabes im Bereich der Dehnungsaufnehmer zurückzuführen und muss in weiteren Versuchen untersucht werden.

### 3 Zusammenfassung

Darf eine Struktur aufgrund sonst auftretender unzulässiger Schwächungen nicht so verändert werden, dass ein Kraftaufnehmer eingebaut werden kann, können Dehnungsaufnehmer an der Oberfläche der Struktur eingesetzt werden, um die inneren Kräfte zu bestimmen. Dabei gilt es jedoch zu beachten, dass eventuell auftretende Biegeverformungen der Bauteile die Ergebnisse verfälschen und deshalb durch Mehrfachmessung und anschließende phasenrichtige Addition der Signale kompensiert werden müssen.

### 4 Literatur

- /1/ Beitz, W.; Küttner, K.-H. [Hrsg.]: Taschenbuch für den Maschinenbau / Dubbel, 14. Auflage, Berlin, Heidelberg, New York: Springer 1981

## Vorstellung der Rapid Tooling Verfahrenskette auf der Hannover Messe Industrie 2002

Trenke, D.

*Im April diesen Jahres stellte das IMW auf dem Gemeinschaftsstand „Innovationsland Niedersachsen“ im Rahmen der Hannover Messe Industrie die am Institut vorhandene Rapid Tooling Verfahrenskette vor. Hierzu wurden Exponate aus Forschung- und Entwicklung aber auch aus Kooperationen mit Industrieunternehmen präsentiert.*

*This year in April the IMW displayed the present Rapid Tooling facilities of the institute at the community booth „Innovationsland Niedersachsen“ at the Hannover Exhibition „Industry“. Research and development samples and also those through co-operations with the industry were on exhibition.*

### 1 Einleitung

Unter Rapid Tooling wird die Herstellung von Werkzeugen - überwiegend das Lasersintern von Formen - mit den Methoden des Rapid Prototypings verstanden. Rapid Prototyping umfasst dabei als Oberbegriff alle Herstellungsverfahren, die es ermöglichen, generativ Bauteile direkt aus 3D-CAD-Daten zu erzeugen.

Die Qualität und das Einsatzspektrum der gesinterten Produkte wird dabei aber nicht nur vom eigentlichen Bauprozess, sondern von der gesamten Rapid Tooling Verfahrenskette bestimmt. Die Verfahrenskette setzt sich aus folgenden Schritten zusammen:

Zu Beginn steht die CAD-Konstruktion des zu sinternden Bauteils. Hierbei sind diverse konstruktive Besonderheiten für eine Rapid Tooling gerechte Gestaltung der Produkte zu beachten, um die Vorteile des Lasersinterns in seiner Gesamtheit nutzen zu können und den Nachbearbeitungsaufwand zu minimieren.

Im nächsten Schritt müssen die CAD-Daten für den Bauprozess aufbereitet werden. Hierzu gehört das Erzeugen der Schichtinformationen und die Zuordnung der geeigneten Belichtungsparameter und

-strategien in Abhängigkeit von den gewünschten Bauteileigenschaften.

Die so erzeugten Daten werden dann zur Rapid Tooling Anlage übertragen, in der das Bauteil durch schichtweises Aufschmelzen eines Metallpulverbettes entsteht. Durch dieses schichtweise Generieren ist es möglich, sehr komplexe Geometrien innerhalb kürzester Zeit herzustellen.

Zur Verbesserung der Oberflächenqualität und der Festigkeit können die Bauteile abschließend noch infiltriert und sandgestrahlt werden /1/.

Am IMW wird auf allen Gebieten der Rapid Tooling Verfahrenskette geforscht und entwickelt.

Hierzu gehören z. B. das Erarbeiten von Konstruktionsrichtlinien für eine Rapid Tooling gerechte Gestaltung der Bauteile, die Optimierung von Sinterparametern in Abhängigkeit von den verwendeten Metallpulvern, das Ermitteln des Prozessverhaltens von bislang beim Lasersintern nicht verwendeten Materialien und die Veredelung der Rapid Tooling Produkte durch Beschichten, Infiltrieren und Sandstrahlen. Weitere innovative Einsatzgebiete der Rapid Tooling Technologie, auf denen das IMW tätig ist, sind die Herstellung von Formen für Faserverbundkonstruktionen und das Sintern von Elektroden für das funkenerosive Abtragen.

### 2 Ausgestellte Exponate

Zu den aufgeführten Forschungs- und Entwicklungstätigkeiten des IMW wurden auf der



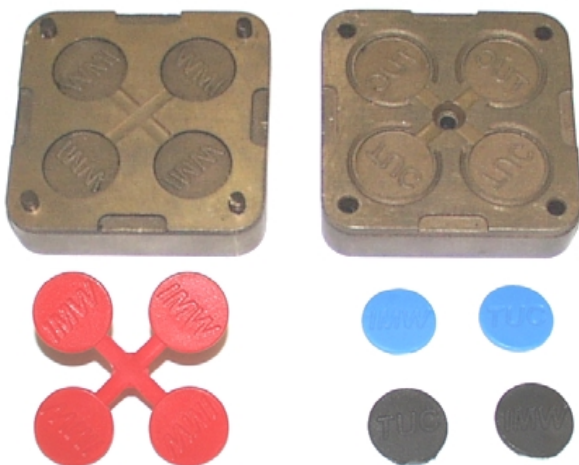
Hannovermesse Exponate ausgestellt (siehe Bild

1), die einen Einblick in die industrielle Anwendungsreife der Rapid Tooling Technologie zeigen.

#### **Bild 1:** Der Messestand des IMW

Zu den Exponaten zählten im Einzelnen:

- Komplexe Formen für den Gummi- und Kunststoffspritzguss und in diesen industriell in großen Stückzahlen produzierte Positivteile. Dabei handelte es sich z. B. um Gummidichtungen und Kunststoffteile aus der Automobilzulieferindustrie.
- Formen für Faserverbundkonstruktionen und entsprechende Erzeugnisse, wie beispielsweise eine Leichtbau traverse, verschiedene Röhren und Zugproben.
- Mit Kupfer beschichtete Rapid Tooling Elektroden für das funkenerosive Abtragen sowie die zugehörigen Schrump- und Schlachtsenkungen in handelsüblichen Werkzeugstählen.
- Funktionsteile und Prototypen, wie Zahnräder, Aggregatbehälter, Verschraubungen, Handyschalen usw.
- Zudem wurden auf der Messe mit Hilfe einer Kunststoffschweißpistole der Firma Orbi-Tech GmbH in einer vom IMW lasergesinterten Form kleine Kunststoffchips hergestellt und verteilt (siehe **Bild 2**). Diese Aufgabe wurde überwiegend von Herrn T. Salmon übernommen, der auch bei den Messevorbereitungen und bei der Standbetreuung involviert war.



**Bild 2:** Auf der Messe hergestellte Kunststoffchips

### **3 Besucher und Feedback**

Neben Besuchern des IMW-Standes, die sich ganz allgemein über die Rapid Prototyping / Rapid Tooling Technologie informieren wollten, kam es zu

zahlreichen Fachgesprächen mit Vertretern nationaler und internationaler Unternehmen. Dabei bekundeten sowohl kleine und mittelständische Firmen als auch große Industriekonzerne (DLR, Daimler Chrysler, Hewlett Packard, usw.), dass dem Lasersintern metallischer Prototypen und Werkzeugen eine immer größere Bedeutung bei der Produktentwicklung und bei der Herstellung von Kleinserien zukommt. Als Grund hierfür wurden überwiegend die geringen Kosten für lasergesinterte Bauteile und die kurzen Lieferzeiten genannt.

Des Weiteren zeigten aber auch regionale und überregionale Politiker Interesse am Ausstellungsstand des IMW. Neben dem Niedersächsischen Minister für Wissenschaft und Kultur T. Oppermann und dem Samtgemeindebürgermeister W. Lampe ließ sich der Wirtschaftsminister Litauens Petras Cesna samt Delegation die Erläuterungen zur Rapid Tooling Verfahrenskette simultan übersetzen.

Erste Kontakte zu Fachbesuchern des Ausstellungsstandes bestehen seit einigen Monaten. Hierzu gehören neben Industrieunternehmen unter anderem auch die Fachschule der Luftwaffe für Maschinentechnik, die sich Anfang Dezember 2002 detaillierter über die Rapid Tooling Verfahrenskette im IMW informieren möchte.

### **4 Zusammenfassung**

Die große Anzahl an Fachbesuchern auf dem Messestand des IMW und deren Interesse sowohl an den präsentierten Exponaten, als auch an den Vor-gestellten Forschungs- und Entwicklungstätigkeiten im Rapid Tooling Umfeld hat gezeigt, dass in der Industrie der Wunsch und der Bedarf an einer Zusammenarbeit beim Lasersintern von metallischen Prototypen und Werkzeugen vorhanden ist.

Die Intension des Gemeinschaftstandes „Innovationsland Niedersachsen“, eine Zusammenführung von Unternehmen und Forschungseinrichtungen zu ermöglichen, konnte, durch die Teilnahme an der Hannover Messe, für das IMW realisiert werden.

### **5 Literatur**

- /1/ Trenke, D.; Ausstellerbroschüre „Hannover Messe 2002“, Hannover, Clausthal 2002



# Technisches Upgrade der Rapid Tooling Anlage EOSINT M 250

Trenke, D.

*Im Juli diesen Jahres wurde die Rapid Tooling Anlage des IMW auf den neuesten Stand der Sintertechnologie aufgerüstet. Neben Bronzepulvern können nun auch Stahl-Pulver verarbeitet werden. Hinzu kommen zahlreiche Erweiterungen der Hard- und Software, so dass die Qualität des Bauprozesses gesteigert wird und neue Forschungs- und Entwicklungstätigkeiten möglich sind.*

*This year in July the Rapid Tooling unit of the IMW was upgraded to the latest standard of sinter technology. Now steel powder can be worked up as well as bronze powder. In addition numerous expansions of the hard- and software were made, so that the quality of the construction process will be increased and new research and development activities are possible.*

## 1 Einleitung

Bei der Rapid Prototyping bzw. Rapid Tooling Technologie handelt es sich um ein relativ neues Fertigungsverfahren, dass erst seit Mitte der 90. Jahre industriell eingesetzt wird. Dem entsprechend schnell und umfangreich sind die technischen Weiterentwicklungen auf diesem Gebiet. Die Hard- und Software Entwicklung verfolgt dabei vorrangig das Ziel, die Einsatzmöglichkeiten der Lasersinterbauteile zu erweitern. Hierzu werden primär neue Sinterpulver verwendet, deren Materialeigenschaften sich denen konventioneller Werkstoffe immer mehr annähern. Diese erfordern aber Modifikationen der Anlagentechnik und der Sinterparameter bzw. Sinterstrategien.



**Bild 1:** Rapid Tooling Anlage EOSINT M 250

## 2 Sinterwerkstoffe

Durch das Maschinen-Upgrade können nun neben Bauteilen aus Bronzepulver mit einer Schichtauflösung von 50 µm (DirectMetal 50) auch Werkstücke aus Bronzepulver mit einer Schichtstärke von 20 µm (DirectMetal 20) und aus Stahlpulver mit 50 µm (DirectSteel 50) oder 20 µm (DirectSteel 20) Schichtstärke generiert werden.

### 2.1 DirectMetal 50

Bei DirectMetal 50 handelt es sich um ein bronzebasiertes Metallpulver, welches eine minimale Schichtstärke von 50 µm erlaubt. Der Genauigkeitsgrad und die mechanischen Eigenschaften der aus diesem Pulver generierten Bauteile reichen für die Herstellung von Prototypen, Spritzgusswerkzeugen und Funktionsteilen in den meisten Fällen aus. Um 100 % dichte Bauteile zu erhalten, ist allerdings eine Infiltration z. B. mit Hochtemperatur-epoxidharz erforderlich. Die Porosität der Werkstücke kann aber auch für selbstentlüftende Werkzeuge oder für Filter ausgenutzt werden. Die Oberflächenqualität der Bauteile kann durch Mikrostrahlen, spanende Bearbeitung oder Polieren noch gesteigert werden. DirectMetal 50 bietet im Vergleich zu den weiterhin vorgestellten Serienwerkstoffen die höchste Baugeschwindigkeit /1/.

Typische Anwendungen von DirectMetal 50:

- Spritzgussformen und -einsätze für Kunststoffteile mit Standzeiten von mehreren 10.000 Teilen,
- direkte Herstellung von metallischen Prototypen.

### 2.2 DirectMetal 20

DirectMetal 20 ist ebenfalls ein bronzebasiertes Metallpulver, welches gegenüber DirectMetal 50 eine höhere Festigkeit, eine größere Detailauflösung und eine bessere Oberflächenqualität aufweist. Durch die verbesserte Oberflächenqualität verringert sich der Nachbearbeitungsaufwand erheblich. Aufgrund der hohen Bauteildichte ist zudem keine Infiltration mit Epoxidharz erforderlich. Eine Ausnahme stellen

Kühlkanäle dar, die weiterhin behandelt werden sollten.

Die minimale Schichtstärke beträgt 20 µm /1/.

Typische Anwendungen von DirectMetal 20:

- Spritzgussformen und -einsätze mit Standzeiten von mehreren 10.000 Kunststoffteilen,
- direkte Herstellung von metallischen Prototypen, bei denen insbesondere isotropische Eigenschaften oder hohe Korrosionsbeständigkeit gefordert sind.

### 2.3 DirectSteel 50

DirectSteel 50 ist ein stahlbasiertes Metallpulver, welches Schichtstärken von 50 µm erlaubt. Neben einer beachtlichen Detailauflösung und Genauigkeit besitzen Bauteile aus DirectSteel 50 eine hohe Dichte und Festigkeit. Die Oberflächenqualität kann durch Mikrostrahlen, Polieren, usw. noch verbessert werden. Der Werkstoff ist insbesondere geeignet für Anwendungen mit hohen Belastungen, wie z. B. Druckguss, Blechstanzen oder Spritzguss mit abrasiven Kunststoffen /1/.

Typische Anwendungen von DirectSteel 50:

- Hochbelastete Spritzgusswerkzeuge mit Standzeiten bis zu 100.000 Kunststoffteilen,
- Druckgusswerkzeuge für Kleinserien bis 1.000 Leichtmetallteilen,
- direkte Herstellung von hochbelasteten metallischen Funktionsprototypen.

### 2.4 DirectSteel 20

DirectSteel 20 ist ebenfalls ein stahlbasiertes Metallpulver, mit einer minimalen Schichtstärke von 20 µm. Die Bauteile besitzen die gleichen Vorteile wie DirectSteel 50 bei gleichzeitig erhöhter Detailauflösung und Oberflächenqualität. Der Werkstoff ist ideal für kleinere Bauteile mit feinen Details und für Werkstücke, bei denen eine hohe Oberflächenqualität benötigt wird. Aufgrund des geringen Nachbearbeitungsaufwandes und der guten Detailauflösung eignet sich DirectSteel daher

insbesondere für Bauteile mit sehr komplexen Geometrien und großem Anteil an Freiformflächen /1/.

Typische Anwendungen von DirectSteel 20:

- Hochbelastete Spritzgusswerkzeuge mit Standzeiten bis zu 100.000 Kunststoffteilen,
- Druckgusswerkzeuge für Kleinserien bis 1.000 Leichtmetallteilen,
- direkte Herstellung von filigranen oder

|  | DirectMetal 50 | DirectMetal 20 | DirectSteel 50 | DirectSteel 20 |
|--|----------------|----------------|----------------|----------------|
| <i>Allgemeine Prozessdaten:</i>            |                |                |                |                |
| min. Schichtdicke (µm)                     | 50             | 20             | 50             | 20             |
| Bauteilgenauigkeit (µm)                    | ± 80           | ± 50           | ± 100          | ± 50           |
| kleinste Wandstärke (mm)                   | 0,7            | 0,6            | 0,9            | 0,7            |
| <i>Oberflächenrauigkeit R<sub>z</sub>:</i> |                |                |                |                |
| ohne Mikrostrahlen (µm)                    | 50 - 60        | 40 - 50        | 60             | 50             |
| nach Mikrostrahlen (µm)                    | 20             | 15             | 35             | 15             |
| nach Polieren (µm)                         | bis 1          | bis < 1        | bis < 1        | bis < 1        |
| <i>Bauteileigenschaften:</i>               |                |                |                |                |
| Restporosität (%)                          | 20             | 8              | 5              | 2              |
| Zugfestigkeit (MPa)                        | 200            | 400            | 500            | 600            |
| E-Modul (GPa)                              | 50             | 80             | 110            | 130            |
| Biegebruchfestigkeit (MPa)                 | 400            | 700            | 950            | 1000           |
| Härte (HB)                                 | 90             | 110            | 200            | 220            |
| max. Temperatur (°C)                       | 400            | 400            | 800            | 800            |

hochbelasteten metallischen Funktionsprototypen.

**Tab. 1:** Werkstoffdaten

Neben den vorgestellten Metallpulvern der Firma EOS werden am IMW aber auch eigene Untersuchungen zum Einsatz von neuen Sinterpulvern vorgenommen. Hierzu zählen z. B. Kupferpulver, Keramiken oder hochfeste Legierungen.

## 3 Anlagenerweiterung

Neben der Einführung von leistungsfähigeren Werkstoffen wurden zahlreiche Hardwareerweiterungen in die Rapid Tooling Anlage implementiert, die die Qualität des Sinterprozesses und der Sinterbauteile steigern.



### 3.1 Atmosphären-Upgrade

Das Atmosphären-Upgrade generiert eine Inertgasatmosphäre (Stickstoff) in der Prozesskammer, die Oxidationen des Metallpulvers während der Laserbelichtung verhindert. Hierdurch verbessern sich die mechanischen Eigenschaften der Sinterbauteile um 10 bis 20 %. Der Sauerstoffgehalt in der Prozesskammer ( $< 1,5 \%$ ) wird kontinuierlich durch eine aktive Messung und Regelung überwacht, um eine hohe Prozesssicherheit zu garantieren /2/.

### 3.2 Keramikklinge

Die Beschichterklinge aus keramischem Material bietet im Vergleich zu den bisherigen Stahlklingen eine wesentlich längere Lebensdauer. Das Risiko von Oberflächenrillen auf den Sinterbauteilen, aufgrund von Beschädigungen der Klinge während des Bauprozesses, wird dadurch erheblich reduziert.

### 3.3 Bauplattformheizung

Die Bauplattformheizung erwärmt die Bauplattform auf ca.  $80^\circ\text{C}$ . Diese Erwärmung hat die Vorteile, dass die erste Belichtungsschicht besser auf der Bauplattform haftet und Eigenspannungen im Bauteil reduziert werden. Die Heizung besteht aus einem elektrischen Flächenheizelement unterhalb der Bauplattform und einer elektronischen Temperaturregelung /3/.

### 3.4 DirectBase Bauplattformen

Zusammen mit dem Werkstoff DirectMetal 20 wurden ebenfalls neue Bauplattformen (DirectBase) eingeführt. Die Oberflächen der Bauplattformen sind zu präzisen Toleranzen flachgeschliffen und mit einem speziellen Sandstrahlprozess nachbehandelt, um eine definierte Rauheit zu erzeugen, die einen zuverlässigen Sinterprozess auch mit  $20\text{ }\mu\text{m}$ -Schichten gewährleistet.

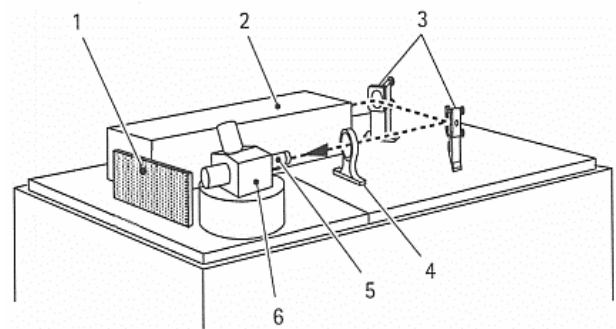
### 3.5 Home-In-Scanner mit gekühlten Spiegeln

Das Scan-Modul vereinigt eine aktive Kühlung der Spiegel durch Druckluft und einen integrierten Home-In-Sensor, der in regelmäßigen Abständen eventuell auftretende Scannerdrifts entdeckt und korrigiert. Dadurch wird eine hohe Positionsstabilität des Laserstrahls aufrecht erhalten. Dies geschieht auch unter variierenden Umgebungsbedingungen oder bei thermischer

Belastung aufgrund langer Belichtungszeiten bei großen Baujobs. Das Ergebnis sind genauere Bauteile, höhere Qualitäten der vertikalen Oberflächen und eine verbesserte Toleranz gegenüber Veränderungen der Umgebungsbedingungen /2/.

### 3.6 Strahlaufweiterblende

Eine vor dem Strahlaufweiter zugefügte Blende extrahiert unerwünschte Laserstrahlmoden. Dies verringert das Risiko von Heizeffekten durch den Laser im Strahlaufweiter und Scan-Modul und stellt damit einen stabilen Fokus sicher. Die effektive Laserleistung wird dadurch nicht verringert. Der



Verlauf des Laserstrahls ist in **Bild 2** dargestellt.

- |                                  |                   |
|----------------------------------|-------------------|
| 1 Steuerkarte                    | 4 Aufweiterblende |
| 2 Laser mit integriertem Shutter | 5 Aufweiteroptik  |
| 3 Umlenkspiegel                  | 6 Scannerkopf     |

**Bild 2:** Strahlverlauf des Lasers

Zudem wurden folgende Modifikationen an der Rapid Tooling Anlage vorgenommen:

- f-Theta-Linse mit spezieller Beschichtung,
- optimiertes Bauplattformkonzept,
- justierbarer Beschichterarm,
- steifere Z-Führung,
- Hochleistungs-Absaugsystem.

Neben der Umrüstung durch die Firma EOS hat auch das IMW eigene Anlagenspezifikationen durchgeführt. Hierzu zählt z. B. eine Online-Überwachung des Bauprozesses mit einer Web-Cam und einer Analysesoftware oder eine Gasdüse innerhalb der Prozesskammer, mit der spezielle Atmosphärenbedingungen an der Sinterstelle erzeugt werden können.

## 4 Upgrade der Prozesssoftware

Das Upgrade der Prozesssoftware (PSW M 250 V3.0) implementiert eine Vielzahl von neuen Merkmalen, welche die Bauteilqualität und Systemproduktivität verbessern:

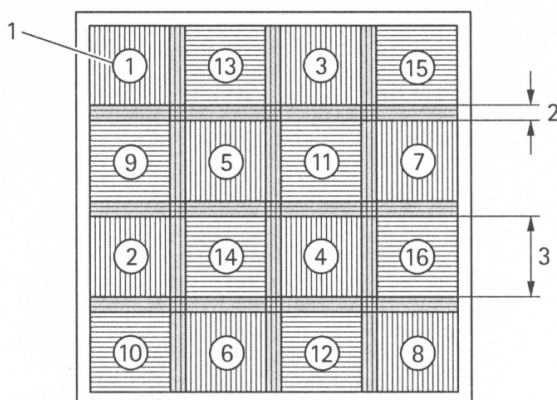
### 4.1 Bauzeitberechnung

Diese Funktion berechnet die zu erwartende Bauzeit eines Jobs anhand der tatsächlichen Scanvektoren. Sie verwendet einen iterativen Algorithmus, der eine realistische Schätzung innerhalb von wenigen Minuten oder eine genaue Bauzeit nach entsprechend längerer Rechnung liefert.

### 4.2 Sinterstrategien

- Vor-/Nachkontur:  
Die Anwendung der Belichtungsstrategie „Vor-/Nachkontur“ verbessert die Genauigkeit der Bauteile und reduziert den Nachbearbeitungsaufwand. Die Doppelbelichtung erhöht zudem die Festigkeit an der Oberfläche der Bauteile.
- Belichtungstyp „Chess“:  
Diese neue Belichtungsstrategie basiert auf dem Belichtungstyp Square, belichtet aber die Kästchen in alternierender Reihenfolge: Vergleicht man die Schicht mit einem Schachbrett, so werden zunächst alle schwarzen Felder und anschließend die weißen Felder belichtet (siehe **Bild 3**). Dadurch wird das Bauteil besonders spannungsarm aufgebaut.

Kästchengröße, Spaltbreite und Überlapp sind

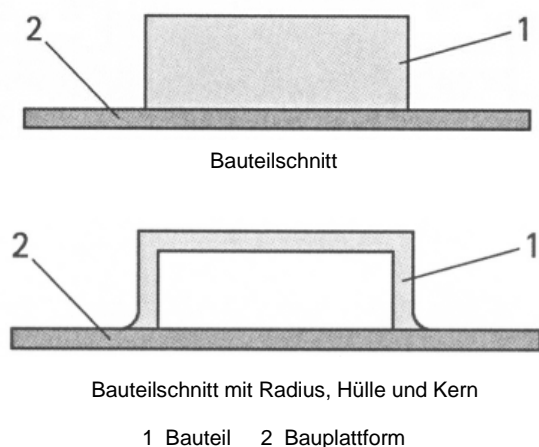


einstellbar.

1 Belichtungsreihenfolge 2 Spalt 3 Quadrat

**Bild 3:** Belichtungsstrategie „Chess“

- Double-Upskin:  
Der Belichtungstyp Double-Upskin belichtet Upskin-Bereiche sowohl in X- als auch in Y-Richtung, was eine höhere Oberflächenqualität, als eine Belichtung in nur einer Richtung, bewirkt.
- Strahlkompensation V2:  
Ein neuer Algorithmus zur Berechnung der Kontur vermeidet unerwünschtes Überspringen und verbessert signifikant die Detailauflösung durch geometrie-optimierte Belichtung, wodurch ein präziseres Sintern von Rändern, Ecken und Bohrungen möglich ist.
- Edge Factor:  
Mit dieser Funktion können filigranere Geometrien belichtet werden, als es bisher möglich war. Kleine und dünne Wände werden z. B. anstatt mit der normalen kontinuierlichen Kontur mit einer einzelnen Scanlinie belichtet. Dies verbessert die Kantendefinition.
- Modul RADIUS:  
Mit dem Modul RADIUS kann an der Bodenfläche von Bauteilen, welche direkt auf die Bauplattform gesintert werden, eine Verrundung mit einstellbarem Radius erzeugt werden (siehe **Bild 4**). Dadurch wird die Anbindung an die Bauplattform verbessert. Beim Sintern von Bauteilen direkt auf die Bauplattform ist eine Hülle an der Bauteilunterseite nicht erforderlich. Dieser offene Boden kann ebenfalls mit dem Modul RADIUS erzeugt werden.



**Bild 4:** Modul „RADIUS“

## 5 Zusammenfassung

Durch das Maschinen-Upgrade der am IMW vorhandenen Rapid Tooling Anlage EOSINT M 250 auf den neuesten Stand der Technik hat sich das Spektrum an Metallpulvern, die beim Sinterprozess

zum Einsatz kommen, wesentlich erweitert. Besonders hervorzuheben sind dabei das 20 µm-Bronzepulver und das 20 µm-Stahlpulver. Diese Werkstoffe überzeugen neben der hohen Detailauflösung durch ihre hohen mechanischen Festigkeiten. Durch die neuen Features der Prozesssoftware, wird die Qualität der Sinterbauteile ebenfalls gesteigert. Zudem stehen eine Vielzahl von Optionen zur Verfügung, die neue Forschungs- und Entwicklungstätigkeiten ermöglichen.

## **6 Literatur**

- /1/ EOS GmbH, DirectMetal und DirectSteel Werkstoffe für EOSINT M, Materialdatenblatt, Planegg/München 2002
- /2/ EOS GmbH, Aufrüstpakete für EOSINT M 250, Planegg/München 2002
- /3/ EOS GmbH, Zubehör und Optionen - EOSINT M 250 Xtended, Planegg/München 2002

## Anforderungen an eine moderne Ingenieurausbildung

Wächter, M.

*Die Vermittlung reinen Fachwissens innerhalb einer universitären Ingenieurausbildung genügt heute weder der globalisierten Arbeitswelt noch den modernen Arbeitsabläufen in der Industrie. Ein zeitnahes Studium muss neben Fachwissen verstärkt Kompetenzen aus dem Bereich der Soft Skills vermitteln. Die Anforderungen an eine moderne Ingenieurausbildung wird von Seiten der Arbeitgeber, der Absolventen und der Ausbilder aufgezeigt.*

*The procurement of expert knowledge within the education of emerging engineers at the university itself neither fulfils the demands of a "global way of working" nor the ones derived from the modern working processes in industry. Actually the studies have to face more on soft skills beside the normal teachings in engineering competences. The requirements on modern education of engineers result from employers and teachers as well as young alumni themselves.*

### 1 Kompetenzen in der Ingenieurausbildung

Die globalisierte Arbeitswelt und die modernen Arbeitsabläufe stellen geänderte Ansprüche an die Ingenieurausbildung. Die Universitäten müssen neben der bisherigen Ausrichtung der Lehre auf das Fachwissen verstärkt Methoden-, System- und Sozialkompetenz vermitteln.

Ein gewisses Maß an Fachwissen ist unerlässlich für die Ingenieurausbildung, aber ist es nicht auch möglich, wenn branchenspezifisches Wissen nur exemplarisch gelernt wird und ansonsten mehr Wert auf das Erlernen von Methoden gelegt wird? Ist es notwendig, dass der Impulssatz zum einen in der Strömungslehre, dann bei den Dampfturbinen, den Gasturbinen und ein weiteres mal bei den Wasserturbinen gelehrt wird? Reicht es nicht, die Methode zu vermitteln, wie man sich in dieses Fachgebiet selbständig einarbeitet? Diese Vorgehensweise wird als Methodenkompetenz bezeichnet.

Neben dem Fachwissen müssen alle Ingenieure über die Fähigkeit verfügen, miteinander zu kommunizieren, dies setzt voraus, dass ein fachübergreifendes Wissen vermittelt wird (Systemkompetenz). Der Maschinenbauer muß bei einer Anlage in

der Lage sein, sich fachlich mit einem Verfahrenstechniker, Werkstoffwissenschaftler oder Elektrotechniker zu verständigen /1/.

Der Block Sozialkompetenz beinhaltet die Gebiete Teamfähigkeit, moderne Arbeitstechniken, Selbstmanagement und Zeitmanagement, die mittlerweile in den Lehrplan einiger ingenieurwissenschaftlicher Studiengänge integriert sind.

Auf die Notwendigkeit neben Fach- auch Schlüsselqualifikationen (Soft Skills) zu beherrschen wird in diversen Beratungsbroschüren für Hochschulabsolventen hingewiesen /2, 3/.

Die Fähigkeiten des Ingenieurs weitsichtig zu planen, richtig zu entscheiden, Projekte zügig und rationell durchzuführen, Produkte zu realisieren und Ergebnisse genau zu kontrollieren, werden in /4/ als Kompetenz definiert. Diese Kompetenz wird in die drei Kompetenzbereiche Fach-, Methoden- und Sozialkompetenz sowie die Schlüsselqualifikationen unterteilt und als notwendige Qualifikation der Ingenieure in der Wirtschaft angeführt.

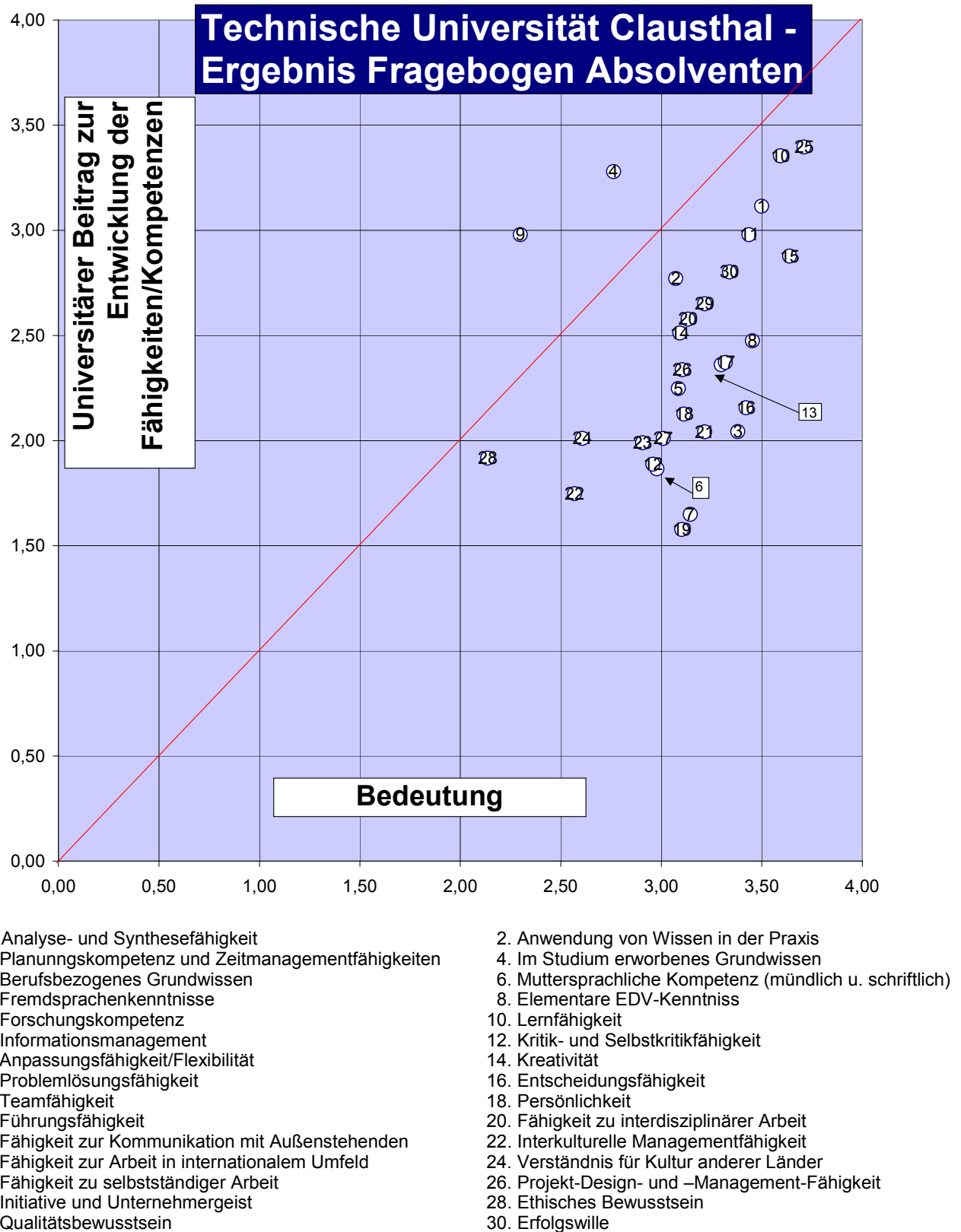
Das Anforderungsprofil für Hochschulabsolventen eines ingenieurwissenschaftlichen Studiums wird durch Befragung unterschiedlicher Institutionen /5/ sowohl durch erlernbare Fähigkeiten wie Fachwissen, außerfachlichen Kenntnissen und überfachliche Qualifikationen als auch durch persönliche Eigenschaften beschrieben.

### 2 Umfrage zum Berufsbild des Ingenieurs

Die Entwicklung eines Leistungspunktesystems für ingenieurwissenschaftliche Studiengänge ist das hochgesteckte Ziel im Projekt "Entwicklung und Erprobung eines integrierten Leistungspunktesystems in der Weiterentwicklung modularisierter Studienangebote am Beispiel der Ingenieurwissenschaften" gefördert durch die Bund-Länder-Kommission. An diesem Projekt sind acht deutsche Hochschulen beteiligt /6/. Für die Bewertung studentischer Leistungen mit Kreditpunkten soll zunächst erfasst werden, welche Kompetenzen und daraus abzuleitenden Lernziele der Arbeitsmarkt von den Studierenden erwartet.

Die Ermittlung, der von einem Hochabsolventen erwarteten Kompetenzen aus Sicht der Arbeitgeber, wird als eine wichtige Voraussetzung zur Lösung dieser Aufgabe angesehen. Aufbauend auf diesen Ergebnissen sollen die Lernziele des Studienganges entwickelt werden, um anschließend

Kriterien für die Leistungspunkte definieren zu können. Als zweite Sicht wird die Meinung der Hochschulabsolventen zu ihren Erfahrungen mit der gegenwärtigen Hochschulausbildung eingeholt. Die Bewertung der Lehrenden wird als dritte Sichtweise herangezogen um ein aktuelles Bild über die Wich-



**Bild 1:** Umfrageergebnisse der Hochschulabsolventen

tigkeit der unterschiedlichen Fähigkeiten und Kompetenzen zu erhalten.

Der genutzte Fragebogen wurde von den Leitern des europäischen Pilotprojekts *Tuning Higher Education Structures in Europe*, das vom Generaldirektorat für Bildung und Kultur der Europäischen Kommission gefördert wird, entworfen /7/. Die Einbindung des Fragebogens in das BLK - Projekt sowie die Vorbereitung der Umfrage und Auswertung des Fragebogens wurde von der am Projekt beteiligten Fachhochschule Aachen übernommen /8/.

Der Fragebogen besteht aus einem Informationsteil, einem befragerspezifischen Teil und einem für alle Befragungsgruppen identischen fachspezifischen Teil /9/. Die Fragen innerhalb des fachspezifischen Teils beziehen sich auf die Fertigkeiten und Kompetenzen, die im Beruf benötigt werden sowie das Niveau der Entwicklung dieser Fertigkeiten und Kompetenzen, wie sie im Studium vermittelt wurden.

## 2.1 Absolventen

Die Absolventen der letzten fünf Jahre in den ingenieurwissenschaftlichen Studiengänge der TU Clausthal wurden um Mithilfe gebeten. Es wurden 288 Fragebögen versandt, von denen 39 zurückkamen, da die Anschrift nicht mehr aktuell war, so dass von effektiv 249 Fragebögen ausgegangen werden kann. Der Rücklauf betrug 97 Fragebögen, dies entspricht einer Quote von 39 %.

Die in Bild 1 dargestellten Umfrageergebnisse zu den im Studium erworbenen Kompetenzen zeigen, dass die Forschungskompetenz (9) und das Grundlagenwissen (4) stärker ausgebildet werden als später in der Industrie nachgefragt wird, alle anderen Kompetenzen sind nach Meinung der Berufsanfänger während des Studiums nicht so intensiv vermittelt worden, wie es für den Berufseinstieg wünschenswert gewesen wäre. Die stärksten Abweichungen zwischen Bedeutung und Ausbildung ergaben sich bei der Planungs- und Zeitmanagementkompetenz (3), den Fremdsprachenkenntnissen (7), der Entscheidungs- (16) und Führungsfähigkeit (19), der muttersprachlichen Kompetenz (6) und der Kommunikation mit Außenstehenden (21). Eine insgesamt hohe Bedeutung für das spätere Berufsleben wird der Fähigkeit zu selbständiger Arbeit (25), der Problemlösungs- (15), Lern- (10) sowie der Analyse- und Synthesefähigkeit (1) zugeschrieben. Untergeordnete Bedeutung hat das ethi-

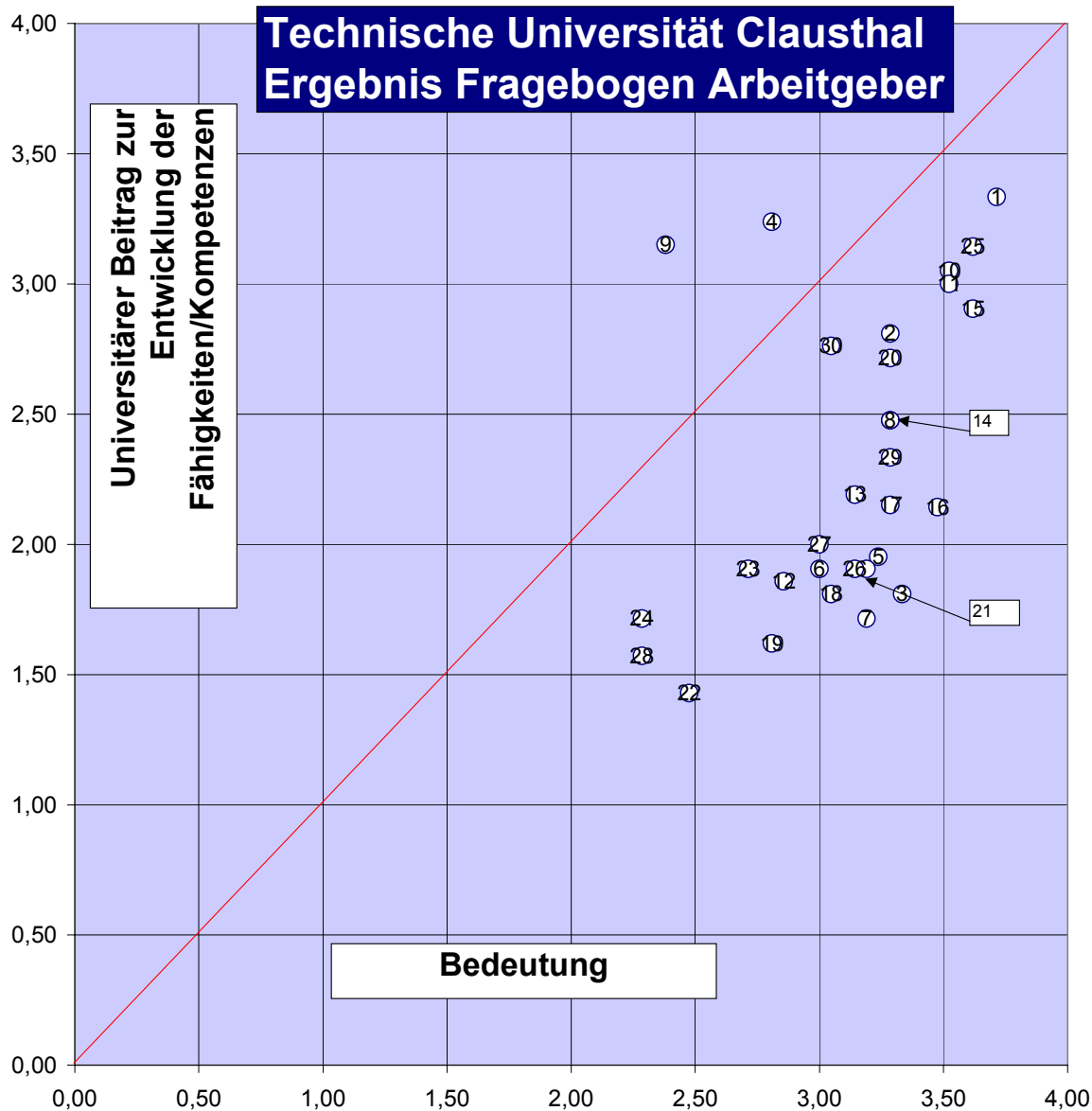
sche Bewusstsein (28), die interkulturelle Managementfähigkeit (22), das Verständnis für andere Kulturen (24) sowie Forschungskompetenz (9). Zu der Umfrage muß angemerkt werden, dass in der Umfrage alle Absolventen der ingenieurwissenschaftlichen Studiengänge befragt sind und kein Rückschluß auf einen speziellen Studiengang möglich ist.

## 2.2 Arbeitgebern

Der Fragebogen wurde an 39 Arbeitgeber versandt, von denen angenommen wurde, dass diese Absolventen der TU Clausthal beschäftigen. An dieser Stelle muss angemerkt werden, dass natürlich keine Gewissheit darüber besteht, ob die Fragebögen nur für Absolventen der TU Clausthal ausgefüllt wurden. Es liegt vielmehr nahe, dass generelle Forderungen an Hochschulabsolventen aufgeführt wurden. Die Auswertung konnte für 21 Fragebögen durchgeführt werden, was einem Rücklauf von 54 % entsprach.

Kennzeichnend ist, dass die Arbeitgeberseite (Bild 2) ebenso wie bei den Absolventen eine zu starke Ausbildung des Grundlagenwissens (4) und der Forschungskompetenz (9) anmerkt, die defizitäre Ausbildung wird aus den Bereichen Planungs- und Zeitmanagementkompetenz (3), Fremdsprachenkenntnisse (7), Kommunikation mit Außenstehenden (21), Entscheidungs- (16) und Führungsfähigkeit (19) deckungsgleich zu den Absolventen angeführt. Zusätzlich sollte mehr im Bereich des berufsbezogenen Grundwissens (5), der Persönlichkeit (18) sowie der Projekt-, Design- und Managementfähigkeit (26) getan werden. Von Seite der Arbeitgeber werden die Analyse- und Synthesefähigkeit (1), die Fähigkeit zu selbständiger Arbeit (25), die Problemlösungs- (15), Lernfähigkeit (10) und das Informationsmanagement (11) mit einer hohen Bedeutung für den Berufseinstieg belegt, dies entspricht im wesentlichen der Absolventenbeurteilung. Eine geringe Bedeutung wird dem Verständnis anderer Kulturen (24), dem ethnischen Bewusstsein (28), der Forschungskompetenz (9) und der interkulturellen Managementfähigkeit (22) zugesprochen.

Die Arbeitgeber sind in vielen Fällen auch Absolventen ingenieurwissenschaftlicher Studiengänge, dies erklärt wahrscheinlich die auftretenden Parallelen in der Bewertung der Fertigkeiten und Kompetenzen.



1. Analyse- und Synthesefähigkeit
3. Planungskompetenz und Zeitmanagementfähigkeiten
5. Berufsbezogenes Grundwissen
7. Fremdsprachenkenntnisse
9. Forschungskompetenz
11. Informationsmanagement
13. Anpassungsfähigkeit/Flexibilität
15. Problemlösungsfähigkeit
17. Teamfähigkeit
19. Führungsfähigkeit
21. Fähigkeit zur Kommunikation mit Außenstehenden
23. Fähigkeit zur Arbeit in internationalem Umfeld
25. Fähigkeit zu selbstständiger Arbeit
27. Initiative und Unternehmergeist
29. Qualitätsbewusstsein

2. Anwendung von Wissen in der Praxis
4. Im Studium erworbenes Grundwissen
6. Muttersprachliche Kompetenz (mündlich u. schriftlich)
8. Elementare EDV-Kenntnis
10. Lernfähigkeit
12. Kritik- und Selbstkritikfähigkeit
14. Kreativität
16. Entscheidungsfähigkeit
18. Persönlichkeit
20. Fähigkeit zu interdisziplinärer Arbeit
22. Interkulturelle Managementfähigkeit
24. Verständnis für Kultur anderer Länder
26. Projekt-Design- und -Management-Fähigkeit
28. Ethisches Bewusstsein
30. Erfolgswille

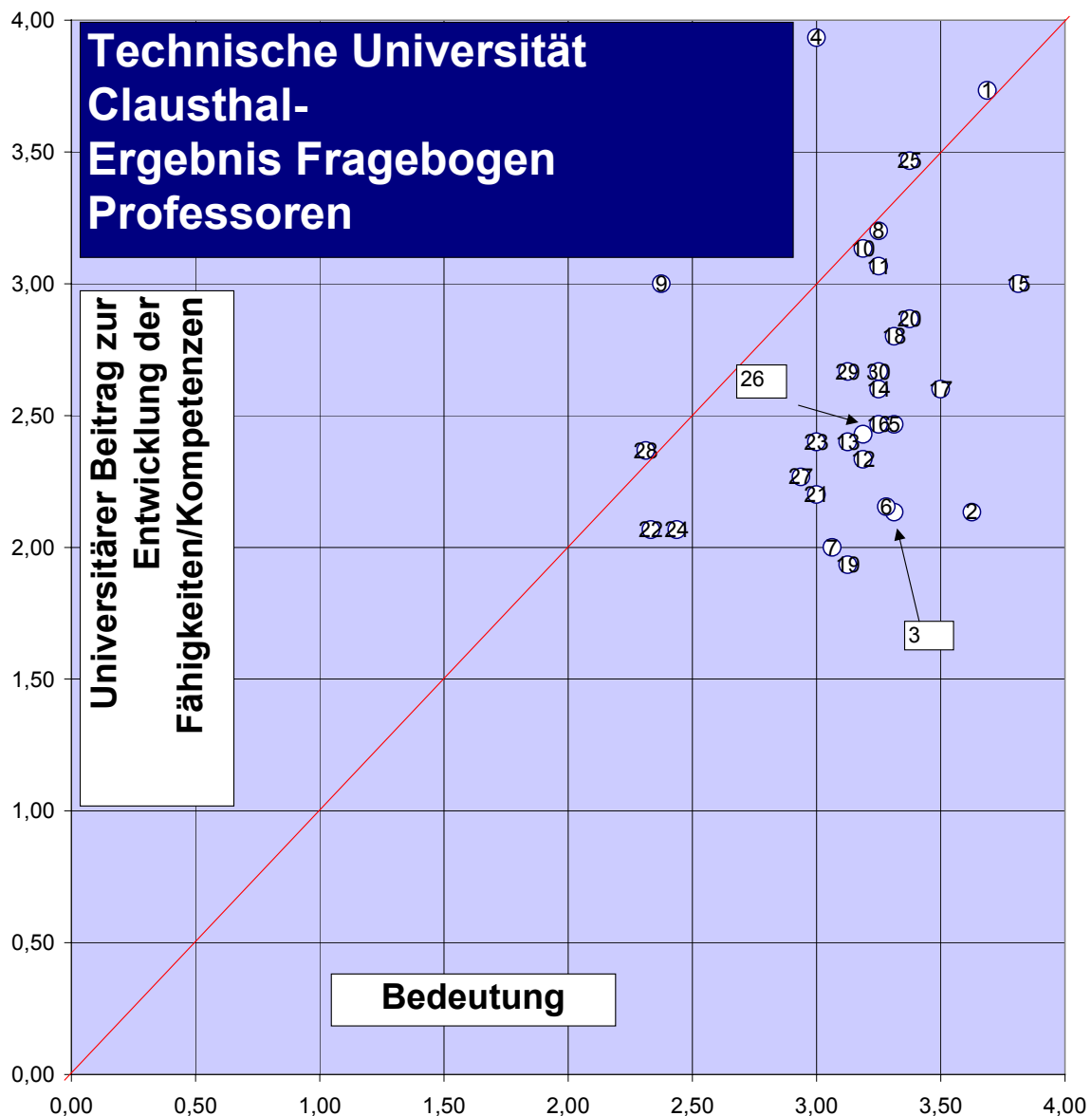
**Bild 2:** Umfrageergebnisse der Arbeitgeber

### 2.3 Lehrenden

Zur Abrundung der Betrachtung fehlt noch die Bewertung der Ausbildung aus der Sicht der Lehrenden, diese wird mit den Ergebnissen der Befragungen der Arbeitgeber und Absolventen kombiniert,

um so ein aktuelles Bild über die Wichtigkeit der unterschiedlichen Fähigkeiten und Kompetenzen zu erhalten. Der Fragebogen wurde an die Lehrenden im Fachbereich Maschinenbau, Verfahrenstechnik, Chemie versandt, der Rücklauf von 16 Fragebogen entsprach einer Quote von 53 %.





- |  |  |
|--|--|
| 1. Analyse- und Synthesefähigkeit                  | 2. Anwendung von Wissen in der Praxis                    |
| 3. Planungskompetenz und Zeitmanagementfähigkeiten | 4. Im Studium erworbenes Grundwissen                     |
| 5. Berufsbezogenes Grundwissen                     | 6. Muttersprachliche Kompetenz (mündlich u. schriftlich) |
| 7. Fremdsprachenkenntnisse                         | 8. Elementare EDV-Kenntnis                               |
| 9. Forschungskompetenz                             | 10. Lernfähigkeit  |
| 11. Informationsmanagement                         | 12. Kritik- und Selbstkritikfähigkeit                    |
| 13. Anpassungsfähigkeit/Flexibilität               | 14. Kreativität  |
| 15. Problemlösungsfähigkeit                        | 16. Entscheidungsfähigkeit                               |
| 17. Teamfähigkeit                                  | 18. Persönlichkeit                                       |
| 19. Führungsfähigkeit                              | 20. Fähigkeit zu interdisziplinärer Arbeit               |
| 21. Fähigkeit zur Kommunikation mit Außenstehenden | 22. Interkulturelle Managementfähigkeit                  |
| 23. Fähigkeit zur Arbeit in internationalem Umfeld | 24. Verständnis für Kultur anderer Länder                |
| 25. Fähigkeit zu selbstständiger Arbeit            | 26. Projekt-Design- und -Management-Fähigkeit            |
| 27. Initiative und Unternehmergeist                | 28. Ethisches Bewusstsein                                |
| 29. Qualitätsbewusstsein                           | 30. Erfolgswille   |

**Bild 3:** Umfrageergebnisse der Professoren

Als Ergebnis lässt sich festhalten, dass auch hier die Meinung besteht, dass die Forschungskompetenz (9) zu hoch im Vergleich zu der Bedeutung in der Industrie angesiedelt ist (Bild 3). Die größte Abweichung zu den Aussagen der Absolventen und Ar-

beitgebern lässt sich bei der Aussage zum im Studium erworbenen Grundwissen (4) feststellen. Der universitäre Beitrag wird von Professorensseite mit annähernd 4 eingestuft, wobei die Absolventen und Arbeitgeber einen universitären Beitrag von 3,25

sehen, Einvernehmen besteht von allen Seiten, dass der universitäre Beitrag zur Bedeutung überbewertet ist.

Ein ideales Verhältnis liegt nach Aussage der Lehrenden im Bereich der Analyse- und Synthesefähigkeit (1), der elementaren EDV-Kenntnisse (8), der Lernfähigkeit (10), des Informationsmanagements (11), der interkulturellen Managementfähigkeit (22), der Fähigkeit zur selbständigen Arbeit (25) und des ethnischen Bewusstseins (28) vor. Defizite werden in der praktischen Wissensanwendung (2), der Planungskompetenz und Zeitmanagementfähigkeit (3), der muttersprachlichen Kompetenz (6) und Fremdsprachenkenntnisse (7) sowie der Führungsfähigkeit (19) gesehen.

Die Professoren sehen in der Problemlösungsfähigkeit (15), der Analyse- und Synthesefähigkeit (1), der Wissensanwendung in der Praxis (2) und der Teamfähigkeit (17) einen hohen Stellenwert, untergeordnet sind das ethnische Bewusstsein (28), die Forschungskompetenz (9), das interkulturelle Management (22) und das Verständnis anderer Kulturen (24) eingestuft.

Die Abweichung der Nennungen zu der höchsten und niedrigsten Bedeutung zu den Absolventen und Arbeitgeber ist gering, es tritt zwar eine Verschiebung ein, aber keine grundlegend anders gewichtete Zuordnung der Kompetenzen zu den Ausbildungszielen.

Die Fertigkeit das Wissen in der Praxis anzuwenden (2) wird von den Lehrenden als wichtig erachtet, aber der universitäre Beitrag gering eingestuft, dieses wird dagegen von Arbeitgebern und Absolventen als ein positiver universitärer Beitrag angesehen. Gegenläufig wird die Persönlichkeitsbildung (18) von Seiten der Lehrenden als eine positive Komponente der Hochschulausbildung dargestellt, nach Aussage der Arbeitgeber und Absolventen ist dabei der universitäre Beitrag geringer als von Lehrendenseite angeführt.

Bei Betrachtung der Fertigkeiten und Kompetenzen bei denen eine Abweichung der Zuordnung Bedeutung/universitärer Beitrag größer 25 % vorliegt, läßt sich für die Aussagen der Absolventen, Arbeitgeber und Lehrenden eine gemeinsame Tendenz feststellen. Es handelt sich übereinstimmend mit der Planungskompetenz und Zeitmanagementfähigkeit (3), der muttersprachlichen Kompetenz (6), den Fremdsprachenkenntnissen (7), der Kritik- und Selbstkritikfähigkeit (12), der Führungsfähigkeit (19) und der Fähigkeit zur Kommunikation mit Außen-

stehenden (21) durchweg um Fähigkeiten, die gegenwärtig nicht Bestandteil der universitären Ausbildung sind.

### 3 Zusammenfassung

Die Umstrukturierung der Ingenieurausbildung ist nicht im verschlossenen Kämmerlein möglich. Die Mitarbeit und Einbeziehung der Studierenden und Lehrenden ist unerlässlich, ferner ist eine aktive Beteiligung der Industrie als spätere Arbeitgeber des Hochschulproduktes "Absolvent" notwendig. Die Ausbildungsziele des jeweiligen Studienganges und der jeweiligen Hochschule durch die Fachkompetenz, Methodenkompetenz, Systemkompetenz und Sozialkompetenz zu definieren ist eine anspruchsvolle Aufgabe, die es zu lösen gilt.

### 4 Literatur

- /1/ Dietz, Peter: Zukunftsorientierte Ingenieurausbildung, ERZMETALL 53 (2000) Nr. 10
- /2/ Döbler, Michaela: Die zweite Seite der Kompetenz: Soft Skills, Karriereführer Hochschulen, 15. Jahrgang, Nr. 2, 2001
- /3/ Planung des beruflichen Erfolges, Zukunftschancen 2002, 4. Auflage 2002
- /4/ Thust, Peter H.: Tätigkeiten und Qualifikationen des Ingenieurs/der Ingenieurin im Berufsleben, Berufsstart Technik, Der Stellenmarkt für Hochschulabsolventen SS 02
- /5/ IMPULS-Stiftung: Der Ingenieurberuf in Zukunft - Qualifikationsanforderungen und Beschäftigungsaussichten, Institut der deutschen Wirtschaft Köln, 1999
- /6/ <http://www.tu-ilmeneau.de/LPS/>
- /7/ [http://europa.eu.int/comm/education/tuning\\_de.html](http://europa.eu.int/comm/education/tuning_de.html)
- /8/ BLK-Projekt: Entwicklung und Erprobung eines integrierten Leistungspunktesystems in der Weiterentwicklung modularisierter Studienangebote am Beispiel der Ingenieurwissenschaften, 1. Zwischenbericht AP1 Verknüpfung der organisatorischen Bildung von Modulen mit der Umstellung auf ein Leistungspunktesystem, FH Aachen 2002
- /9/ BLK-Projekt: Entwicklung und Erprobung eines integrierten Leistungspunktesystems in der Weiterentwicklung modularisierter Studienangebote am Beispiel der Ingenieurwissenschaften, 1. Zwischenbericht AP4 Internationalisierung, TU Clausthal 2002

## Verschlungene Wege - Servermigration von Microsoft® Windows® NT4 auf Windows® 2000

Müller, D.; Niklaus, J.

*Die heutige IT-Landschaft ist von stetiger Weiterentwicklung geprägt. Aufgrund nicht mehr ausreichender Hardware-Ressourcen beim in die Jahre gekommenen Server wurde der Einsatz eines neuen Domänencontrollers am IMW notwendig. Somit galt es für die Administratoren, die Migration der Serverkomponenten zu organisieren und möglichst ohne große Ausfallzeiten durchzuführen. Nach grundlegenden Planungen der Administratoren und einer ausgiebigen Testphase erfolgte Ende 2001 die Umstellung. Dank der Vorbereitung gestaltete sich diese problemlos und erfolgreich. Der folgende Artikel bietet eine kurze Übersicht der Maßnahmen, die bei der Windows-Servermigration durchgeführt wurden und zieht ein kurzes Resümee.*

*The today's IT landscape is marked by constant developments. Due to no longer sufficient hardware resources of the aged server the use of a new domain-controller became necessary at the IMW. Thus, it was up to the administrators to organise the migration of the server components and preferably to enforce this without long down times. After basic planning of the administrators and an extensive test phase, the conversion took place end of 2001. Thanks to the detailed preparation this became problem-free and successful. The following article offers a brief overview of the measures, which have been carried out during the Windows server migration and makes a short summary.*

### 1 Einleitung

Bei der derzeitigen rasanten Entwicklung der IT-Landschaft ist es zeitweise schwer, auf dem aktuellsten Stand der Dinge bezüglich Hard- und Software zu bleiben. Dabei ist es aber auch wichtig, nicht jeder Neuentwicklung schnell und unbedacht nachzugeben. Entscheidungen, ob ein Software-Update wirklich notwendig ist oder ob die oft kostspielige Anschaffung neuer leistungsstärkerer Hardware sinnvoll erscheint, sollten wohl überlegt getroffen werden. Unüberlegte Entscheidungen ziehen oft einen Rattenschwanz an zusätzlich auftretenden Problemen nach sich, die einen oft

erheblichen zusätzlichen Arbeits- und Administrationsaufwand bedeuten, was entsprechend mit Kostensteigerungen einhergeht.

Durch eine generelle Umorientierung der IT-Struktur der Personal-Arbeitsplätze am IMW auf PC-Clients und der Erweiterung der PC basierten Arbeitsplätze für Studenten Mitte des Jahres 2000, kam dem vorhandenen Windows® NT4 Server eine schwerpunktmäßige Bedeutung zu. Aufgrund der erhöhten Belastung in bezug auf Datentransfer und –volumen traten zunehmend Engpässe auf. Vor allem die Festplattenkapazitäten erreichten ihre Limits.

Der entstandene Handlungsbedarf wurde von den Administratoren des IMW erkannt. Dementsprechend wurde in mehreren Meetings der Administratoren darüber diskutiert und beschlossen, wie zu reagieren ist, was zu tun ist und wie demzufolge vorgegangen werden sollte. Dabei lag die Prämisse darauf, den Rechnerbetrieb möglichst ungestört ohne größere Ausfälle (geringe Down Time) weiterführen zu können.

Zu den Entscheidungen, die von den Administratoren getroffen wurden, zählten u.a.:

- Anschaffung einer neuen Server-Hardware
- Migration auf aktuelles Serverbetriebssystem
- Migration auf aktuelle Mailserver-Version
- Neue Anti-Viren Software
- Reorganisation serverbasierter Software

Mit der Entscheidung für die Anschaffung einer neuen, separaten Hardwareplattform war es möglich, den neuen Server parallel zum im Betrieb befindlichen aufzubauen und zu testen. Zudem stand der "alte" Server bei möglichen auftretenden Problemen während der Umstellungsphase jederzeit als Backup zur Verfügung.

### 2 Vorbereitung der Migration

#### 2.1 Identifikation der Komponenten

Zur Vorbereitung einer möglichst problemlosen Migration aller Serverkomponenten erfolgte zunächst eine grundlegende Planungsphase. In

ersten Sitzungen der Administratoren des IMW wurden die Rahmenbedingungen und Verantwortlichkeiten für die Servermigration festgelegt. Dabei wurden die entsprechenden Komponenten und Methodiken identifiziert, die für den vollständigen Migrationsprozess der Gesamtstrukturen von Relevanz waren. Der Gesamtablauf gliederte sich dabei in zwei getrennte Abschnitte, nämlich einmal die Neuinstallation eines Servers und die anschließende Migration der Domänenkomponenten. Recherchen über Internet, Literatur und Handel lieferten einen ersten Überblick über Umfang der Teilaufgaben und eventuell mögliche Problembereiche. So war es möglich, schon früh Lücken in der geplanten Ablaufprozedur zu erkennen und diese gezielt zu verifizieren.

## 2.2 Serverkomponenten

Der erste Abschnitt der Serverumstellung betraf die Neuanschaffung einer den Anforderungen entsprechenden leistungsfähigen Hardwareplattform, sowie die Installation und Einrichtung der Server-Software und notwendiger Applikationen.

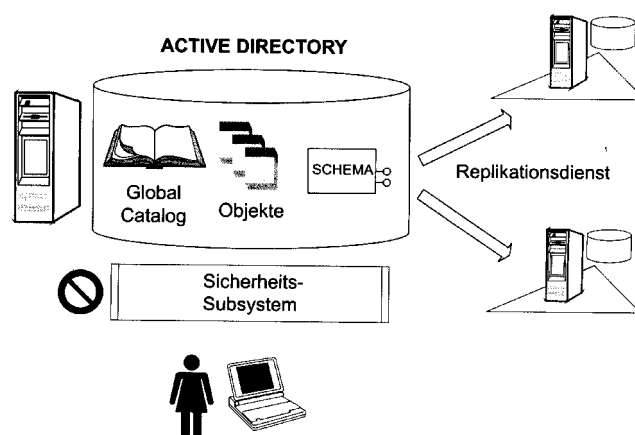
Die Eckdaten der Hardware-Spezifikationen der gewählten Server-Plattform sind: 19" Gehäuse, 1GB RAM, Dual Board mit zwei 1GHz Intel® Pentium III Prozessoren, Highpoint Raid Controller (on board), 2 x 60GB Hard Disk (Raid Level 1, Stripe Set), SMC 9432 Etherpower II 10/100 Mbit, ATI Rage Fury Pro 32MB.

Bei der Wahl des Serverbetriebssystems erfolgte ein Upgrade von Microsoft Windows NT4.0 Server auf Windows 2000 Server (Multilanguage) und damit ein Wechsel zum Active Directory Verzeichnissystem. Die Hauptkomponenten an zusätzlicher Applikationssoftware, die auf dem modernisierten Server zum Einsatz kommen, sind als Organisationssystem ein Microsoft Exchange Server 2000, die Anti-Viren Software Sophos Anti-Virus®, für die Datensicherheit das Backup-System Veritas NetBackup™ Version 3.4, der hausinterne Datenbankserver Filemaker 5, sowie das Client- und Software-Management Tool NetInstall® 5.51 von der NetSupport GmbH.

## 2.3 Active Directory™

Active Directory (AD) ist der aktuelle Verzeichnisdienst von Microsoft, der zusammen mit

Windows 2000 Server eingeführt wurde. Dieser Dienst vereinigt das Internet Domain Name System (DNS), die X.500-Namenskonventionen und das Lightweight Directory Access Protocol (LDAP) /1/. Diese mächtige Kombination ermöglicht es, sowohl applikationsspezifische Verzeichnisse als auch Verzeichnisse von Netzwerkbetriebssystemen in einem allgemein zugänglichen Verzeichnis zur Verfügung zu stellen. Das Active Directory selbst ist eine Datenbank, deren Aufbau von einem Schema geregelt wird (**Bild 1**). Sie stellt Methoden zur schnellen Generierung von Abfragen zur Verfügung und wird, je nach Bedarf, im Netzwerk repliziert. Der Zugang auf die Daten wird durch die Vergabe von Rechten für authentifizierte Benutzer geregelt.



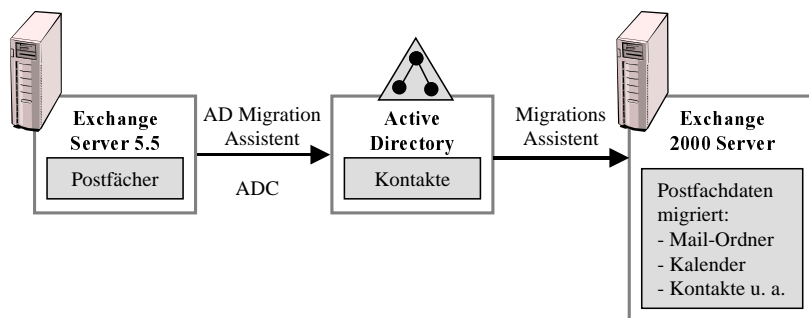
**Bild 1:** Grundstruktur des Active Directory

## 2.4 Active Directory™ Migrationsprogramm

Zur Durchführung der Migration der vorhandenen Windows NT4 Domäne auf Windows 2000 Server wurde das Active Directory™-Migrationsprogramm (ADMT) von Microsoft® ausgewählt. Das ADMT stellt, wie von Microsoft® propagiert, eine einfache, sichere und schnelle Lösung zur Migration von Windows NT zum Active Directory-Verzeichnisdienst von Windows 2000 Server bereit. Als Systemvoraussetzungen für ADMT muss auf der Zieldomäne das Betriebssystem Windows 2000 Server und auf der Quelldomäne entweder Windows 2000 oder Windows NT 4.0 Server (PDC) mit SP4 oder höher installiert sein /4/.

Das Programm unterstützt den Systemadministrator vor Beginn der Migration beim Diagnostizieren möglicher Probleme. Mithilfe vordefinierter, aufgabenbasierter Assistenten innerhalb der Migrationssoftware ist es sowohl möglich Benutzer, Gruppen und Computer zu migrieren, als auch korrekte Dateiberechtigungen

einzustellen. Basierend auf der Berichtsfunktion (Protokolldateien) des Programms können die



**Bild 2:** Migrations-Szenario Exchange

Auswirkungen der Migration vor und nach Verschiebungsoperationen eingeschätzt werden. In vielen Fällen kann bei einem Problem während der Migration die vorherige Struktur automatisch mit der Rollbackfunktion wiederhergestellt werden.

Beim Migrieren von Benutzern und Gruppen mithilfe von ADMT wird das ADMT-Programm auf der Konsole der Zieldomäne, in unserem Falle auf dem Windows 2000 Server installiert. Abgesehen davon muss keine weitere Software auf den Computern in der Quelldomäne installiert werden. Beim Migrieren von Computern installiert das ADMT automatisch Dienste (so genannte Agenten) auf den Quellcomputern. Somit ist es nicht nötig, Software manuell auf jeden einzelnen Quellcomputer zu laden, um die Migration durchführen zu können. Nachdem der Agent seine Aufgabe erfüllt hat, wird er automatisch deinstalliert.

## 2.5 Exchange Migrations Assistant

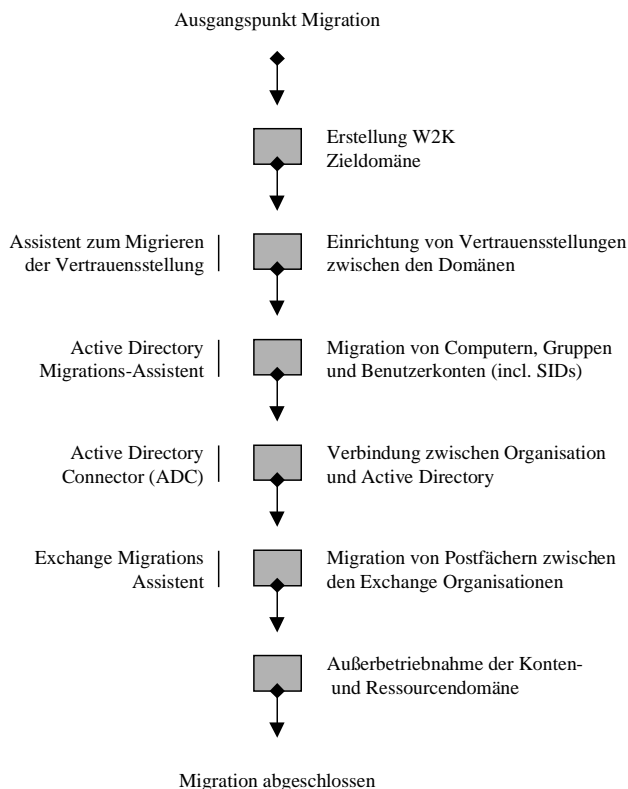
Neben der Migration von Benutzerkonten und Domänenressourcen, war es zusätzlich noch notwendig, die zugehörigen Postfächer aus der alten Exchange-Organisation zu übernehmen. Eine direkte Möglichkeit der Migration von Postfächern zwischen zwei Exchange-Organisationen, hier von Exchange 5.5 zu Exchange 2000, bot erst der im Exchange 2000 Server Service Pack 2 enthaltene Migrations Assistant.

Die Postfachinformationen werden in den beiden Exchange Versionen an unterschiedlichen Orten abgelegt. Wurden sie in Version 5.5 noch direkt im Exchange Verzeichnis verwaltet, sind sie in Exchange 2000 in die Struktur des AD eingebettet. Folglich ist es notwendig, alle Konten der alten Organisation im AD existent zu haben.

Deshalb wurde, auch wenn wir nicht die größte Organisation sind, die erweiterte Migrations-Strategie (siehe **Bild 2**) angewendet, um möglichst wenig Störungen im laufenden Betrieb und durch die Koexistenz der Verzeichnisse eine zusätzliche Absicherung zu haben. Dazu benötigt man den Microsoft Active Directory Connector (ADC), der nach Anwendung des ADMT eine Verbindung zwischen Organisation und AD herstellt. Die Ausführung des Migrations Assistenten sorgt für die Übernahme der Daten aus den Postfächern der alten Exchange-Organisation. /2,3/

## 3 Durchführung der Migration

Aufgrund der durchgeführten Planungsphase waren alle benötigten Komponenten und Applikationen bekannt.



en bekannt. Dementsprechend wurde auf dieser Basis ein Vorgehensplan (siehe **Bild 3**) aufgestellt, wie letztendlich die Servermigration realisiert werden sollte.

Am Ausgangspunkt der

**Bild 3:** Ablaufschema der Servermigration am IMW

Migration stand zunächst die Erstellung einer neuen Zieldomäne auf Basis von Microsoft Windows 2000 Server. Nach der Komplettinstallation der Serversoftware und der zusätzlichen Applikationen (vgl. Kap. 2.2) stand der neue Server im Parallelbetrieb zur Verfügung.

Um Transaktionen zwischen verschiedenen Domänen durchführen zu können ist es notwendig, Vertrauensstellungen zwischen diesen Domänen einzurichten. Dies muss auf beiden Seiten geschehen (bidirektional, transitiv) und wird von dem Assistenten zum Migrieren der Vertrauensstellung unterstützt. Nach der Aktivierung der Vertrauensstellung zwischen den zu migrierenden Serverkomponenten wurden mithilfe des ADMT (vgl. Kap. 2.4) die Computerkonten, sowie die Gruppen und Benutzerkonten inklusive der Security Identifier (SID) auf die neue Domäne übertragen. Die Übernahme erfolgte schrittweise für die einzelnen Komponenten. Entsprechend Kap. 2.5 wurde im weiteren Ablaufschritt mithilfe des ADC eine bidirektionale Verbindung zwischen dem AD und der alten Exchange-Organisation hergestellt. Daraufhin konnten die vorhandenen Postfächer den assoziierten Benutzern im AD zugewiesen werden. Nach kurzem Parallelbetrieb der beiden Server wurde zunächst der alte Domänen-Controller abgeschaltet und nach Bereinigung weniger Inkonsistenzen vollständig außer Betrieb genommen. Damit war die Migration erfolgreich abgeschlossen.

#### 4 Resümee

Um eine Servermigration mit allen Komponenten möglichst problemlos durchführen zu können, sollte man dieses Vorhaben im Voraus sehr gut durchdenken und planen, besonders wenn es sich um Microsoft® Produkte handelt. Ebenso sollte die Umstellung nicht unter Zeitdruck vollzogen werden, um eine umfangreiche Testphase zu haben. Diese Testphase wurde am IMW ausführlich genutzt, was sich aber letztendlich bei der problemlosen Umstellung ausgezahlt hat. Denn leider ist es in diesem Bereich in Bezug auf z. T. unvollständige oder falsche Anleitungen und Hilfstipps notwendig, die richtige Vorgehensweise aus der Menge an Informationen zusammen zu puzzeln.

Nur wenige mehr oder weniger negative Aspekte fielen bei der Durchführung am IMW auf. Durch die Übernahme der SIDs wurden den Benutzern generierte Passwörter für die neue Domäne

zugewiesen. Dies bedeutete zwar eine Extra-Belastung, wurde aber gleichzeitig zur Reorganisation der Benutzerstruktur genutzt. Als einzige Leistungseinschränkung war das ADMT nicht in der Lage, die Pfade zum Benutzerprofilverzeichnis automatisch anzupassen. Da der Benutzerstamm am IMW aber überschaubar ist, wurde dies in Kauf genommen und manuell angepasst. Durch die Umstellung der Domänen-Administratoren und Dienstknoten war eine Umstellung notwendig, die manuell auf einigen Clients angepasst werden musste.

Alles in allem kann man die Servermigration am IMW als erfolgreich bezeichnen. Ohne große Einschränkungen der User, die dies teilweise gar nicht mitbekamen, und Zwischenfälle konnte die Umstellung vollzogen werden. Und auch wenn ein Parallelbetrieb teilweise als zu aufwendig (bzgl. Kosten und doppeltem Administrationsaufwand) angesehen wird, ist man dabei aber immer auf der sicheren Seite.

#### 5 Zusammenfassung

Zum Ende des Jahres 2001 wurde am IMW eine Servermigration von Microsoft Windows NT4.0 auf Windows 2000 durchgeführt. Basierend auf einer Planungs- und Testphase wurde die Umstellung auf das Active Directory Verzeichnissystem mithilfe entsprechender Migrationsprogramme realisiert, die von Microsoft zur Verfügung gestellt werden. Die Durchführung der Migration erfolgte schrittweise nach einem festen Ablaufschema ohne große Komplikationen.

#### 6 Literatur

- /1/ Michela, F., Palme, M.: Microsoft Active Directory; Microsoft Press Deutschland, 2000
- /2/ Peuthert, O.: Exchange 2000 Praxisbuch; Franzis' Verlag GmbH, 2001
- /3/ Martin, Michele et. al.: Migrating Mailboxes from Microsoft® Exchange Server version 5.5 to Microsoft Exchange 2000 Server; <http://www.microsoft.com/exchange/techinfo/interop/MgrtMbox.doc>
- /4/ Microsoft Whitepaper, <http://www.microsoft.com/technet/treeview/default.asp?url=/technet/prodtechnol/windows2000serv/downloads/admttool.asp>

# Nachhaltige internationale Qualifizierung - Doppeldiplom

Schäfer, G.

*Die universitäre Ausbildung ist nicht alleine auf Grundlagen ausgerichtet, sondern bettet ihre gesamte Kompetenzbreite in den gesellschaftlichen Zusammenhang ein. Mit dem in diesem Aufsatz beschriebenen Programm zu Doppel-Diplomierung wird den Studierenden der TU Clausthal in einer Welt fortschreitender Internationalisierung eine nachhaltige Qualifizierungsmöglichkeit angeboten.*

*The education at university level is not only faced onto the basics but has also to be incorporated into the societal environment. This article briefly describes the „double-degree“ programme. This programme provides sophisticated, internationalized courses of study to the students of the Clausthal University of Technology.*

## 1 Idee des Projekts

Die Internationalisierung der Märkte in den Bereichen Handel und Dienstleistung, zu denen auch der Maschinenbau zählt, erfordert in steigendem Masse, neben der fachlichen und methodischen Kompetenz, auch die soziale Kompetenz und internationale Qualifizierung unserer Studierenden. Deutliche Indikatoren finden sich dafür wöchentlich in den Stellenangeboten, sowohl bei großen Konzernen als auch bei vielen kleineren und mittelständischen Betrieben.

Die Technische Universität Clausthal (TUC) hat traditionell einen hohen Anteil ausländischer Studierender, die sich in der überschaubaren Studienatmosphäre schnell integrieren und wohlfühlen. Unterstützt werden sie dabei durch ein umfangreiches Sprachkursangebot und die besonders intensive Clausthaler Betreuung. In diesem internationalen Flair keimen auch gerne bei unseren deutschen Studierenden die Wünsche nach einem Auslandsaufenthalt innerhalb ihres Studiums. Erste konkrete Unterstützung finden diese Ideen auch wieder in unserem weiten Sprachkursangebot im Rahmen des Studium Generale.

Desweiteren verfügt die Hochschule über eine beachtenswerte Anzahl von internationalen Hochschulkooperationen, die durch das europäische Förderprogramm Sokrates/Erasmus

eine finanzielle Unterstützung des Studierendenaustauschs ermöglichen. Auf dieser Basis sind bisher viele ein- und zweisemestrige Studienaufenthalte an den ausländischen Partnerhochschulen durchgeführt worden. Der überwiegende Anteil waren dabei die einsemestrigen Aufenthalte, bei denen in der Regel eine Studien- oder Diplomarbeit an der Partnerhochschule bearbeitet wird.

Die Grundlage für solche ortsungebundenen Studienleistungen ist die innerhalb der Kooperationsverträge zwischen den Partneruniversitäten vereinbarte Anerkennung von Studienleistungen. Damit können die Studierenden problemlos solche externen Studienleistungen an ihrer Heimathochschule in ihr Studium einbringen. Die Ausweitung dieser modulweisen Anerkennung von Studienleistungen, bis hin zum vollständig modularisierten Studium wird derzeit innerhalb eines anderen Projektes untersucht. Dieses Projekt wird von der gemeinsamen Bund-Länder-Kommission (BLK) zunächst im nationalen Rahmen betrieben.

Der Deutsche Akademische Austausch Dienst (DAAD) hat auf internationaler Ebene ein Förderprogramm zur Einrichtung binationaler Studiengänge eingerichtet. Das Ziel ist die nachhaltige internationale Qualifizierung der Studierenden in diesen binationalen Studiengängen und der entsprechende Nachweis mit Aussenwirkung durch die Verleihung eines Doppeldiplomgrades. Das Doppeldiplom wird üblicherweise in Form der Diplomurkunden beider beteiligten Hochschulen in Verbindung mit einem Diploma Supplement verliehen. Weitere Bedingungen für solche Doppeldiplom-Studiengänge sind nachfolgend kurz aufgelistet:

### Bedingungen:

- Verleihung beider Abschlüsse
- SOKRATES-Partnerschaft
- Auslandsaufenthalt mindestens ein Jahr
- Einhaltung der Regelstudienzeit
- Befreiung von Studiengebühren



Als Erweiterung der bisher üblichen ein- bis zweisemestrigen Auslandsaufenthalte ist hier ein mindestens einjähriger Studienaufenthalt vorgesehen, der in Verbindung mit der Forderung nach Einhaltung der Regelstudienzeit auch gesteigerte Anforderungen an die inhaltliche Ausgestaltung dieses Studienaufenthaltes ergibt.

D.h. es werden an der Partneruniversität auch normale Lehrveranstaltungen besucht und entsprechende Prüfungen gemacht. Um die Sprachbarriere nicht unangemessen hoch zu legen, werden an den nicht englischsprachigen Hochschulen die Lehrveranstaltungen des ersten Austauschsemesters teilweise in Englisch angeboten. Das Gesamtpaket aus gleich bleibender Regelstudienzeit, Befreiung von Studiengebühren und SOKRATES/ERASMUS-Förderung, öffnet dieses Studienangebot für alle begabten Studierenden, ohne ihnen den Nachteil verlängerter Studienzeiten zu zumuten.

## 2 Beispiel Maschinenbau

Das Tätigkeitsfeld von Maschinenbauingenieuren ist ausgesprochen groß und international geprägt. Ob bei der Entwicklung eines Zahnarztbohrers oder einer künstlichen Herzklappe, der Erstellung eines Autos oder einer Flugzeugturbine – hier wird der kreative analytische Sachverstand von Maschinenbauingenieuren gebraucht. Erfolgreiche Maschinenbauingenieure müssen nicht nur in der Lage sein, verantwortungsvolle Aufgaben in globalen Netzwerken zu übernehmen und über ein hohes Maß an sozialer und ökologischer Kompetenz verfügen, sondern sie müssen auch flexibel und kreativ sein. Sie sollten konstruktiv, wirtschaftlich und technisch denken und über interkulturelle Kompetenz verfügen.

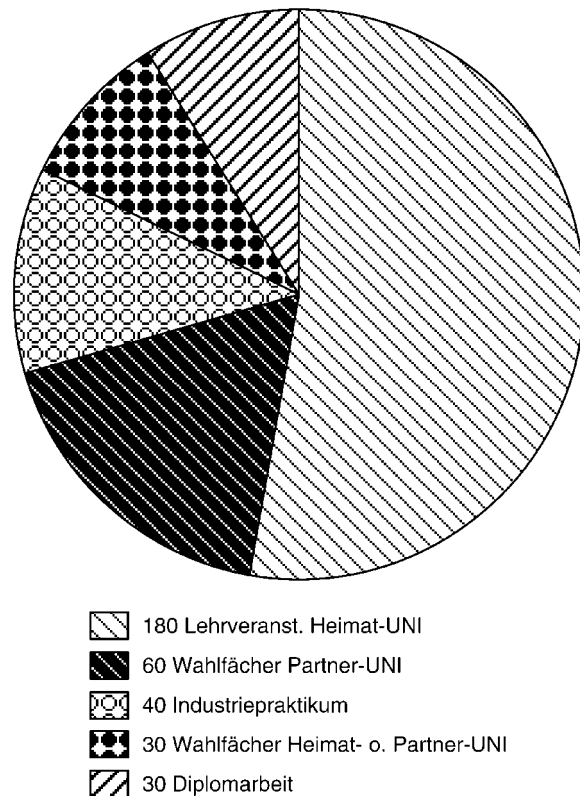
Aufbauend auf den Erfahrungen im binationalen Studiengang Werkstoffwissenschaften mit der Universität Metz wurde an der TUC und der Berg- und Hüttenakademie Krakau (AGH), zwischen denen schon länger eine intensive Kooperation besteht, ein binationaler Studiengang Maschinenbau geschaffen.

### 2.1 Struktur und Inhalt des Studiengangs

Für diesen binationalen Studiengang wird eine Gleichwertigkeit der Grundausbildung festgesetzt. Im Hauptstudium werden verschiedene Studienrichtungen angeboten, "Konstruktion,

Fertigung und Betrieb" und "Elektrotechnik und Systemautomatisierung" an der TUC sowie "Mechanical Engineering" und "Automatics and Robotics" an der AGH. An der AGH wird der Diplomabschluss nach zehn Semestern vergeben, an der TUC nach neun Semestern, für den binationalen Abschluss wird ein zehensemestriges Studium (340 ECTS Punkte) erforderlich.

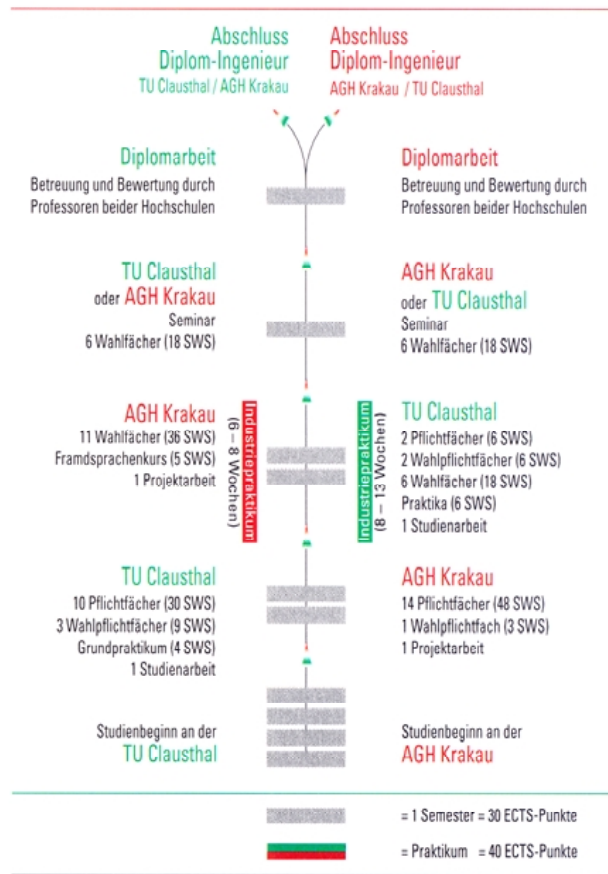
**Verteilung der Kreditpunkte (ECTS)**



**Bild 1:** Verteilung der Kreditpunkte für ein Maschinenbaustudium mit Doppeldiplom Universitäten Krakau – Clausthal

Die Studierenden besuchen in den ersten sechs Semestern ihre Heimathochschule, anschließend für zwei bis drei Semester Lehrveranstaltungen an der Partnerhochschule und fertigen eine Studienarbeit an. Die Diplomarbeit ist im zehnten Semester zu schreiben, sie wird gemeinsam von einem Professor der AGH und von einem Professor der TUC betreut und bewertet. Im Studiengang Maschinenbau ist an der TUC ein 26-wöchiges Industriepraktikum erforderlich, dies kann zu Teilen im jeweiligen Ausland absolviert werden. Die Sprachkurse (Polnisch bzw. Deutsch) können als nichttechnisches Fach im Rahmen eines Leistungsnachweises in das Studium eingebracht werden.

Studierende im binationalen Studiengang stellen sich grundsätzlich vor dem Auslandsaufenthalt einen Prüfungsplan für die Gasthochschule zusammen und lassen ihn an der Heimathochschule genehmigen.



**Bild 2:** Studienablauf zum Doppeldiplom Maschinenbau TU Clausthal (links) / Universität Krakau (rechts)

## 2.2 Partnerhochschulen

### 2.2.1 Technische Universität Clausthal

Die Technische Universität Clausthal (TUC) blickt auf eine lange Geschichte zurück und findet ihre Wurzel in der 1775 gegründeten „Clausthaler montanistischen Lehrstätte“. Als Ergebnis stetiger Aktualisierungen besteht das Lehrangebot heute aus: Naturwissenschaften, Materialwissenschaften, Maschinenbau, Energiesystemtechnik, Verfahrenstechnik, Informationstechnik sowie Studiengängen, die wirtschaftswissenschaftliche Inhalte mit natur- und ingenieurwissenschaftlichem Hintergrundwissen verschmelzen. Mit ihren rund 100 Professoren, 450 wissenschaftlichen Mitarbeitern und rund 3.000 Studierenden besitzt die TU Clausthal eine für intensive Betreuung

ausgelegte Struktur, die zu interdisziplinärer Forschung genutzt wird.

### 2.2.2 Akademia Gorniczo-Hutnicza w Krakowie

Krakau, an der Weichsel gelegen, ist mit fast einer Million Einwohnern eine der großen Städte Polens, und zugleich ein Bildungszentrum mit einer wunderschönen Altstadt. Mit mehr als zehn Hochschulen, deren Angebot von Medizin über Jura, Wirtschaftswissenschaften, Sprachwissenschaften, Philosophie bis zu den Natur und Ingenieurwissenschaften reicht und durch eine Kunst- und eine Schauspielhochschule geziert wird. Unsere Partnerhochschule, die Berg- und Hüttenakademie Krakau (AGH) ist eine der größten und ältesten Hochschulen in Polen. Sie wurde 1919 gegründet und bildet heute ca. 20.000 Studierende aus. Die Akademie besteht aus 14 Fakultäten, darunter Maschinenbau und Robotik. Basierend auf der engen Zusammenarbeit mit der Industrie kann die AGH Krakau die Synergien zwischen Forschung und Lehre besonders für die Ausbildung im ingenieurwissenschaftlichen Bereich nutzen. Viele Studienangebote an der Berg- und Hüttenakademie sind einzigartig in Polen. Die Bandbreite der Fachgebiete reicht von traditionell bis innovativ und erlaubt den Studierenden innerhalb des mehrstufigen Studiums eine individuelle Fächerkombination.



Beiden Hochschulen gemeinsam ist der traditionelle Energie- und Rohstoffbezug, der aktiv und konsequent im Studien- und Forschungsangebot durch Umweltschutztechnologien und erneuerbare Energien weiterentwickelt wurde.

### 2.3 Bisheriger Projektverlauf

Zum Wintersemester 2001/2002 haben sich 8 Studierende aus Krakau an der TUC im binationalen Studiengang Maschinenbau

eingeschrieben. Diesen Studierenden wurde ein Tutor, der heimatssprachkundig ist, zugewiesen, der die Eingewöhnung an der TUC unterstützen hat. Im Wintersemester 2002/2003 sind bereits 12 Studierende aus Krakau an der TUC eingeschrieben. Die Wohnungsversorgung wird von den Programmverantwortlichen auf beiden Seiten unterstützt.

In der vorlesungsfreien Zeit zwischen dem Sommer- und Wintersemester haben bereits sechs der ersten Studierenden ihr Pflicht-Industriepraktikum in Deutschland mit großem Erfolg absolviert. Dabei hatten sie Gelegenheit, auch finanziell noch ein wenig für das zweite Studienjahr an der TU Clausthal vorzubereiten, da die SOKRATES/ERASMUS-Förderung auf ein Jahr begrenzt ist. Das Niedersächsische Wissenschaftsministerium unterstützt die Einführung dieses binationalen Studienganges mit der Universität Krakau. Die Kooperation mit der Partnerhochschule gestaltet sich auch über diesen einzelnen Studiengang hinaus sehr produktiv. Es finden regelmäßige Arbeitstreffen und ein intensiver E-Mail Verkehr zwischen den Programmverantwortlichen statt.

Der Anteil deutscher Studierender, die eine Doppel-Diplomierung anstreben ist noch relativ klein, daraus ergibt sich speziell für Programme im nicht-englischsprachigen Ausland die Schwierigkeit nur annähernd ausgeglichene Verhältnisse im Studierendenaustausch zu erreichen. Umgekehrt haben wir mehr deutsche Studierende die nach Großbritannien oder USA wollen, als Studieninteressierte aus diesen beiden Ländern. Die Probleme sind dabei sehr vielschichtig und liegen zum Teil auch an den sehr starr akkreditierten Studiengängen in Großbritannien. Nach den ersten positiven Erfahrungen in unserem Krakauer Doppeldiplom-Programm haben wir auch inzwischen erste Nachfragen aus den unteren Semestern, die gezielt sprachliche Vorbereitungen treffen wollen. Ein entsprechender polnischer Sprachkurs gehört schon seit vielen Jahren zum Grundangebot im Studium Generale der TUC. In diesem Sprachkurs wurde ebenfalls das neue Studienangebot vorgestellt und interessiert aufgenommen.

### 3 Perspektiven

Das binationale Studienprogramm ist Bestandteil des Diplomstudienganges Maschinenbau und wird

als solches mit dem regulären Studiengang akkreditiert. Das Interesse von polnischer Seite für dieses Angebot ist groß und soll auf andere Studiengänge ausgedehnt werden, die Energiesystemtechnik und Informationstechnik als angewandte Informatik sind derzeit in Vorbereitung. Erste Gespräche zu einer Erweiterung des binationalen deutsch-französischen Studienganges Werkstoffwissenschaften auf einen trinationalen Studiengang werden auch bereits geführt. Die Resonanz des zuständigen Fachbereiches an der TUC auf den deutsch-polnischen Studiengang Maschinenbau ist positiv und es kann davon ausgegangen werden, dass sich dieses Studienangebot nach einem erfolgreichen Abschneiden der ersten polnischen Studierenden etabliert hat und ohne Unterstützung durch den DAAD fortgeführt wird.

## 4 Zusammenfassung

Die starke Internationalisierung der Märkte und Berufsfelder erfordert von erfolgreichen Studierenden eine entsprechende zusätzliche Qualifizierung in der Ausbildung. Die binationale Doppel-Diplomierung stellt eine zeitlich interessante und fachlich fundierte Möglichkeit für den Erwerb internationaler Erfahrungen dar. Die finanzielle Förderung über ERASMUS ermöglicht vielen Studierenden die Teilnahme an einem solchen Projekt. Die Zahl der Studiengänge mit Doppel-Diplomierung steigt derzeit stark an, ist aber sicherlich noch einige Jahre auf verschiedene Studiengänge und Studienorte beschränkt. Die TU Clausthal bemüht sich, im Rahmen ihrer enormen Anzahl von ausländischen Hochschulkooperationen möglichst interessante Doppel-Diplomangebote zu entwickeln.

### 4.1 Weitere Informationen

<http://www.imw.tu-clausthal.de/wwwstud/doppeldipl>

<http://www.daad.de/hochschulen/de/5.3.1.html>

## Jetzt geht's los - Aktuelle Informationen zum 6. Rahmenprogramm der EU

Goltz, M.

*Der folgende Artikel gibt einen kurzen Überblick über die Möglichkeiten der Forschungsförderung im 6. Rahmenprogramm der Europäischen Kommission. Hauptaugenmerk liegt dabei auf den Themen, die den Forschungsschwerpunkten des IMW und seinen Partnern entsprechen.*

*The following article gives a brief introduction to the funding within the 6. framework programme of the European Commission. It is focussing on the topics related to the main research areas of the IMW and its partners.*

### 1 Überblick

Mit dem endgültigen Beschluss des Europäischen Parlaments zum 6. Forschungsrahmenprogramm vom 27. Juni 2002 wurde die Grundlage der Forschungsförderung der Europäischen Union für die nächsten vier Jahre geschaffen. Das 6. Rahmenprogramm (RP) ist in drei Kapitel unterteilt:

- Bündelung und Integration der Forschung der Europäischen Gemeinschaft,
- Ausgestaltung des Europäischen Forschungsraums,
- Stärkung der Grundpfeiler des Europäischen Forschungsraums.

Dabei wird gerade dem ersten Kapitel besondere Aufmerksamkeit gewidmet, was sich bereits an der Budgetzuteilung von 13.800 Mio. bei einem Gesamtbudget von 16.270 Mio. für das 6. RP zeigt.

Die größte Veränderung im Vergleich zum 5. RP der EU sind sicher die neuen Instrumente zur Durchführung der Gemeinschaftsforschung – namentlich die „Integrated Projects“ und die „Networks of Excellence“. Mithilfe dieser Instrumente soll zum einen die Verwaltung vereinfacht werden, zum anderen geht es darum, eine kritische Masse von Forschungskapazitäten zu erreichen und einen Europäischen Mehrwert gegenüber den bereits auf nationaler Ebene durchgeführten Maßnahmen zu erzielen. Obwohl diese neuen Instrumente eindeutig bei der Forschungsförderung bevorzugt werden, soll es

auch weiterhin die ‚klassischen‘ EU-Projekte für kleinere Konsortien geben.

Die Forschungsförderung konzentriert sich auf sieben genau abgegrenzte Bereiche – die ‚Thematischen Prioritäten‘. Zusätzlich gibt es spezielle Maßnahmen auf einem breiteren Feld der Forschung, wozu dann auch zusätzliche horizontale Forschungsmaßnahmen unter Beteiligung kleiner und mittelständischer Unternehmen (KMU) zählen.

Um die inhaltliche Ausgestaltung der thematischen Prioritäten am aktuellen Forschungsbedarf auszurichten, rief die EU am 20.03.2002 zur Einreichung von Interessenbekundungen auf. Anhand der knapp 12.000 eingereichten EoI's wurden die Arbeitsprogramme der Themenbereiche erstellt sowie die Themen der ersten Calls for Proposals festgelegt. Mit ersten Ausschreibungen ist noch im Dezember diesen Jahres zu rechnen.

### 2 Forschungsschwerpunkte

Als besonders förderungswürdig wurden seitens der EU Kommission die folgenden sieben thematischen Prioritäten bestimmt:

- Genomik und Biotechnologie im Dienste der Medizin
- Technologien für die Informationsgesellschaft
- Nanotechnologien, Materialien und neue Produktionsverfahren
- Luft- und Raumfahrt
- Lebensmittelqualität und –sicherheit
- Nachhaltige Entwicklung, globale Veränderungen und Ökosysteme
- Bürger und modernes Regieren in der Wissensgesellschaft

Im Folgenden werden die für die Forschungsschwerpunkte des IMW relevanten Themen näher erläutert.

## 2.1 Technologien für die Informationsgesellschaft

Neben den rein informationstechnischen Grundlagen, wie z.B. Kommunikationsinfrastruktur, Sicherheitstechnologien oder Miniaturisierung mikro-elektronischer Komponenten, sind die Entwicklung mobiler eCommerce und eWork Prozesse sowie das Thema Wissensmanagement Schwerpunkte des IST (Information Society Technologies) Programms. Dies ermöglicht dem IMW die Fortführung der Aktivitäten der EU-Projekte SIMNET, KARE und SEDRES-2. Chancen dazu ergeben sich bereits aus dem ersten Call, der voraussichtlich am 17. Dezember veröffentlicht wird und u. a. das Thema 'Networked businesses and governments' adressiert. Dabei geht es um Lösungen, die vernetzte Organisationen bei der Integration von Prozessen und der gemeinsamen Nutzung von Ressourcen unterstützen.

## 2.2 Nanotechnologien, Materialien und neue Produktionsverfahren

Wesentliche Aspekte dieses Forschungsschwerpunkts sind (neben der Forschung auf dem Gebiet der Nanotechnologien) die Entwicklung neuer so genannter „Wissensbasierter multifunktionaler Materialien“ und neuer Produktionsprozesse und -geräte. In Bezug auf die Möglichkeiten des IMW ist hierbei die Verwendung dieser Materialien sowie deren Einfluss auf die Konstruktionswissenschaft interessant. Dazu können beispielsweise Ansätze zur Herstellung von Prototypen aus inkompatiblen Werkstoffen mithilfe des Rapid Prototypings zählen oder auch die Anpassung der Berechnungsverfahren für 'klassische' Konstruktionselemente auf die Belange der neuen Werkstoffe. Denkbar ist auch die zielgerichtete Konstruktion eines Werkstoffs auf Basis der Anforderungen aus der Produktentwicklung bzw. eine Methode zur zielgerichteten Verwendung neuer Werkstoffe.

## 3 Förderinstrumente

### 3.1 Integrated Projects

Die integrierten Projekte (IP) sind als Förderinstrument zur Generierung neuen Wissens für die thematischen Prioritäten vorgesehen. Dabei geht es vorrangig um das Erreichen ehrgeiziger Forschungsziele. Formelle Kriterien für ein IP sind

eine Dauer von 3-5 Jahren und ein Minimum von 3 Partnern (mindestens zwei aus der EU oder assoziierten Staaten), wobei jedoch davon ausgegangen wird, dass sich im Normalfall mehr als die durchschnittlich 9 Partner des FP5 für ein Projekt zusammenfinden. Die Fördersumme kann einige 10 Millionen Euro betragen, ein Minimum wird dabei nicht angegeben, vorausgesetzt die Ziele sind ausreichend hoch gesteckt und die kritische Masse zur Verwirklichung wird erreicht. Die finanzielle Förderung hängt vom Kostenmodell des Partners und von den durchgeführten Aktivitäten ab. Bei Partnern mit einem (vereinfachten) Vollkosten-Modell beträgt die Förderung maximal 50% für Forschung, 35% für Demonstration, 100% für Training, und 100% für Management des Konsortiums. Ein wesentlicher Unterschied zum FP5 sind die größeren Freiheiten bei der Gestaltung des IP. So müssen bspw. nur für die ersten 18 Monate ein detaillierter Arbeitsplan aufgestellt werden. Zudem müssen nicht alle Partner bereits bei der Antragstellung benannt werden.

### 3.2 Network of Excellence

Die Exzellenznetzwerke (NoE) sind als Förderinstrument eingerichtet, um die Zusammenführung und den Austausch von Wissen innerhalb des Europäischen Forschungsraum zu stärken. Dabei steht der Aufbau dafür notwendiger Strukturen im Vordergrund und nicht die Generierung neuen Wissens. Dazu zählen integrierende Aktivitäten zur Abstimmung der Forschungsziele der beteiligten Partner (bzgl. Ergänzung oder gezielter Spezialisierung) im Hinblick auf das Thema des NoE, ein Programm gemeinsamer Forschungsaktivitäten sowie Aktionen zur Verbreitung des Wissens (wie z.B. Ausbildung von Forschern). Dadurch soll verhindert werden, dass sich die NoE's als geschlossener Klub betrachten. Beachtlich ist hierbei auch die Anzahl der in einem Netzwerk kooperierenden Forscher. Die EU geht hierbei durchaus von mehreren hundert Forschern aus, die formal mindestens 3 Partner repräsentieren, es sollten aber eher mindestens 6 Partner sein. Als Förderzeitraum werden ca. 5 Jahre angenommen. Die finanzielle Förderung dient lediglich der Überwindung organisatorischer Hemmnisse beim Aufbau eines NoE. Sie soll in keinem Fall zu finanzieller Abhängigkeit führen, da dadurch die Dauerhaftigkeit des NoE in Frage gestellt wird.

Daher werden als Anhaltspunkt 1 Mio. pro Jahr für ein Netzwerk von 50 Forschern angegeben.

**4 Weitere Informationen unter:**

- Community Research & Development Information Service – [www.cordis.lu](http://www.cordis.lu)
- Koordinierungsstelle EG der Wissenschaftsorganisationen – [www.kowi.de](http://www.kowi.de)

## Für Clausthal in Kairo

Schlicht, M.; Mitreisende

Am 7. Oktober machte sich unter Leitung von Prof. Dietz eine neunköpfige Delegation vom Institut für Maschinenwesen (incl. dem Studentenpfarrer) auf den Weg nach Kairo. Grund für die einwöchige Reise zur Ain-Shams-Universität war ein erfolgreicher Antrag beim DAAD, der für ein „intercultural program“ austauschwillige Universitäten suchte. Die Idee zu einem solchen Programm wurde vom DAAD nach den Anschlägen vom 11. September 2001 und der Diskussion um einen „clash of civilizations“ geboren. Somit war von Anfang an deutlich, dass es beim Aufenthalt in Kairo um mehr gehen würde als um bloße Führungen durch Institutsgebäude.

Nachdem wir das herbstliche Clausthal bei winterlichen Morgentemperaturen verlassen hatten, kamen wir – via Zürich – am Nachmittag im schwül-heißen Kairo an. Die ca. 13 Millionen Menschen fassende Megapolis am Nil wirkte schon beim Anflug in vielerlei Hinsicht beeindruckend. Die Fahrt vom Flughafen zum imposanten Gästehaus der Ain-Shams-Universität (**Bild 1**) vermittelte einen sich täglich wiederholenden Eindruck vom ägyptischen Verkehrschaos. Endlich angekommen, wurden wir von Prof. Taha herzlich begrüßt. Er fühlte sich für den reibungslosen Ablauf der kommenden Woche verantwortlich und vermittelte uns zahlreiche Eindrücke und persönliche Kontakte.



**Bild 1:** Gästehaus der Ain-Shams-Universität

Das tägliche Programm teilte sich in zwei Hälften. Vormittags standen Besuche an der Universität im Vordergrund. Prof. Dietz warb für ein Studium an

der TU Clausthal, wobei nicht nur die Bilder „Clausthal im Schnee“ bei den ägyptischen Studenten tiefen Eindruck hinterliessen. Die internationalen Studienmöglichkeiten, die Bachelor- und Master-Studiengänge ermöglichen, faszinierten viele Zuhörer. Unser „Clausthaler Missionseifer“ wurde mit überaus großem Interesse wahrgenommen. Bei der Entwicklung von konkreten Ideen bzw. Studienplänen wurde aber schnell deutlich, dass auch an der Ain-Shams-Universität der (Un)Geist einer manchmal arg starren Bürokratie grassiert. Innovative Ideen, für die Prof. Dietz ja berühmt ist, fielen zuweilen in einen Airbag voller Argumente wie „Das haben wir noch nie so gemacht“ oder „Das geht ja gar nicht“ oder „Bei uns ist das anders“. Es bedurfte viel Tee, Schweiss und Überzeugungsarbeit, um ein mutiges Weiterdenken und kreatives Gestalten von Studienmöglichkeiten wachzurufen. Am Ende hatten wir das Gefühl, ein Stück dieses Weges bereitet zu haben.

Von großem Interesse waren die Vorträge der wissenschaftlichen Mitarbeiter des Instituts für Maschinenwesen, die den ägyptischen Zuhörern einen Überblick über die Forschungsschwerpunkte am IMW verschafften. Die ägyptische Studenten- und Professorenschaft staunte nicht schlecht, dass unsere Delegation international und interdisziplinär besetzt war: ein mexikanischer, ein chinesischer, ein rumänischer, aber auch ein paar deutsche Maschinenbauer, daneben ein Geologe, ein Theologe, ein Systemadministrator sowie eine Sekretärin. Wenn das nicht eine schlagkräftige Truppe gewesen ist! In der Tat haben wir uns gut geschlagen in mehr oder minder dialektfreiem Englisch unter dem Gesurre von Klimaanlage und Ventilatoren. Vor allem in den Pausen wurden die Clausthaler Referenten von den ägyptischen Kommilitonen regelrecht belagert und ausgefragt. Hätte ein Fremder nur diese Pausenszenen wahrgenommen, wäre ihm schlagartig die Notwendigkeit internationalen Studienaustausches deutlich geworden.

Eine Premiere ganz eigener Art war mein eigener Vortrag an der Ain-Shams-Universität. Es war sicherlich das erste Mal das ein christlicher Theologe an dieser Universität das öffentliche Wort ergriffen hat. Im Wissen um den „toleranten Geist von Clausthal“ konnte ich gerade auch die muslimi-



schen Studenten herzlich zum Studium an unserer Alma mater einladen. Befürchtungen, die in den arabischen Medien zum Teil geweckt werden, es wäre zur Zeit „gefährlich“ sich in westlichen Ländern zur islamischen Religion zu bekennen, haben in Clausthal keine Berechtigung. Mein Hinweis, dass die Art und Weise zu Studieren auch von der Kultur (und damit u.a. auch von der Religion) bestimmt wird, wurde von Seiten einiger (aber nicht von allen!) Professoren kritisiert.

Einen Überblick über die umfangreichen Lehr- und Forschungseinrichtungen der Ain-Shams-Universität (**Bild 2**) und des Campusgeländes verschaffte uns Iman Taha, eine Assistentin der Ain-Shams-Universität, der wir für ihre Mithilfe bei der Planung und Durchführung unserer Reise nochmals ganz herzlich danken wollen.



**Bild 2:** Einblick in die Gießereitechnik

Die Nachmittage in Kairo dienten dem Kennenlernen der altägyptischen sowie der islamischen Kultur. Neben „selbstverständlichen“ Exkursionen zur den Pyramiden von Gizeh, dem ägyptischen Museum sowie zur Stufenpyramide von Sakkara (**Bild 3**), standen aber auch erlebnisreiche Spaziergänge durch das islamische, koptische und „bazarliche“ Kairo. Außerordentlich interessant waren private Einladungen von zwei Professoren, die uns abends in ihren Privathäusern bewirteten. Die Gespräche tangierten jedesmal die aktuelle politische Einschätzung des USA-Irak-Konfliktes und seiner möglichen Folgen, aber auch die unterschiedlichen Studien- und Berufsperspektiven in Ägypten und Deutschland. Das Miteinander war jedesmal von großer persönlicher Offenheit geprägt, so dass die Clausthaler Delegation mit vielen nachwirkenden Eindrücken am 15. Oktober wieder in Hannover landete.

Wir freuen uns auf einen Gegenbesuch einer Delegation der Ain-Shams-Universität im Dezember hier in Clausthal.



**Bild 3:** Reisegruppe der TUC mit Studenten der Ain-Shams-Universität in Sakkara

# **BERECHNUNGSMODELL DER KONSTRUKTION DES SCHACHTFÖRDERGEFÄßES IM LICHT DER HÄUFIGKEIT VON EIGENSCHWINGUNGEN, DIE AUF EXPERIMENTELLEM WEGE UND MITTELS DER BERECHNUNGEN ERMITTELT WURDEN**

Dzik, S.; Wolny, S.; Siemieniec, A.

*In dieser Abhandlung wurde die Analyse des Einflusses von den die Konstruktion des Schachtfördergefäßes dehnenden Belastungen auf die Häufigkeit der Querschwingungen des ganzen Systems durchgeführt. Außerdem hat man die Häufigkeit von Schwingungen der Konstruktion des Schachtfördergefäßes, die auf experimentellem Wege mit Hilfe von tensometrischen Messungen am realen Objekt ermittelt wurden, mit den Häufigkeiten der Schwingungen, die analytisch für das in der Abhandlung vorgeschlagene Berechnungsmodell ermittelt wurden.*

## **1 Einleitung**

Das Problem der Festigkeit und Betriebsfestigkeit von Maschinen und Industrieanlagen ist ein wichtiges Problem, das an der besonderen Bedeutung gewinnt, wenn die genutzten Maschinen das notwendige Element in dem Herstellungsprozess bilden.

Solch ein Element in der Förderung der Kohle und Erze bilden Förderschächte, darunter vor allem solche Elemente von Förderschächten wie Fördergefäße mit deren Führungssystemen und Hängezeug (von Fördergefäßen und Ausgleichsseilen) sowie Tragelemente des Gefäßes selbst (Zugbänder).

Zu den während der periodischen Kontrollen und Prüfungen von Fördergefäßen am häufigsten aufgedeckten Beschädigungen der Tragelemente gehören Ermüdungsbrüche im Bereich von Knoten, die die Zugbänder mit dem Gefäß, Kopf oder unteren Rahmen verbinden [1]. In den Entwurfsberechnungen für solche Konstruktionsart [1,4], werden Zugbänder und deren Verbindungen bei der Berücksichtigung von Extremkräften bemessen, die eine Summe von Gewichten des Gefäßes, der Ausgleichsseilen und des Förderguts bilden. Es bedeutet, dass in solchen Berechnungen Horizontalkräfte, die eine Folge der gegenseitigen Einwirkung des Förderschachtes und des Gefäßes

während seiner Bewegung sind, nicht berücksichtigt werden.

Die Analyse der möglichen Verformungen von Zugbändern, die während der Bewegung des Gefäßes entstehen und die unter anderem eine Folge von im System Fördergefäß – Führungsschuh – Einstrich auftretenden Spielen und Ablenkungen der Führungsstücke von der Vertikale sind, deutet darauf hin, dass die mit ihnen verbundenen horizontalen Belastungen einen wesentlichen Einfluss auf die momentanen Werte der darin entstehenden Spannungen haben können, und was damit zusammenhängt, auch auf deren Ermüdungsfestigkeit [5].

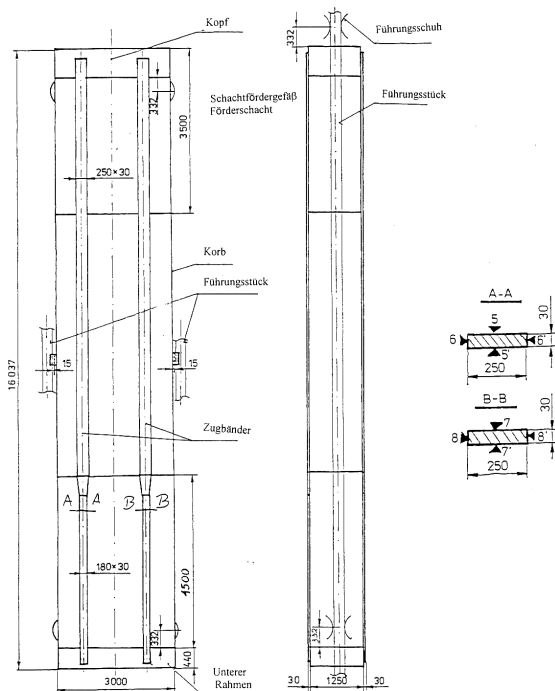
Das Problem der gegenseitigen Einwirkung des Gefäßes und des Einstrichs wurde eingehend in der polnischen technischen Literatur erörtert. Es geht hier um die Arbeiten der Untersuchungsteams an der AGH, GIG und Schlesischen Technischen Hochschule. Obwohl es viele interessante und wirksame Arbeiten in diesem Bereich gibt, tauchen immer neue zu lösende Probleme auf. In diesem Zusammenhang kann der Versuch, das Rahmenmodell der Konstruktion des Schachtfördergefäßes zu erstellen, der sich auf den Vergleich der Häufigkeit von Schwingungen des Systems stützt, die auf experimentellem Wege und mit Hilfe von Berechnungen bei der Berücksichtigung der Seiten- und Längstbelastungen in der Hinsicht der Ermittlung von inneren Kräften in Zugbändern bestimmt wurde, den Beitrag zur Festigkeitsanalyse der Konstruktion des Schachtfördergefäßes leisten.

Um den Einfluss der Belastungen auf den Wert und Charakter der Änderungen von Spannungen in den Zugbändern kennen zu lernen, wurden an den ausgewählten Punkten der Konstruktion des Schachtfördergefäßes tensometrische Sensoren aufgeklebt und Messungen durchgeführt. Die Ergebnisse von diesen Messungen haben es ermöglicht, die Ermüdungsfestigkeitsanalyse dieser Bereiche durchzuführen, in denen Brüche entstehen. Die Analyse des dynamischen Verlaufs

von Spannungen deutet darauf hin, dass deren momentaner Wert in Zugbändern scheint aus zwei Teilen zu bestehen. Den grundlegenden Teil, der mit Achsenkraft verbunden und proportional zu deren Wert ist, und den zweiten, der durch die sich schnell verändernden Horizontalkräfte des Förderschachtes hervorgerufen wird. Es bedeutet, dass die Zugbänder zusätzlich gebogen werden, was einen wesentlichen Anstieg von Spannungen in den Knotenpunkten verursacht, die sie mit anderen Gefäßelementen verbinden.

## 2 Die Bestimmung der Periode und Häufigkeit von Schwingungen des Schachtfördergefäßes mit der Tragkraft von $Q = 30$ Mg aufgrund der Messungen von Verformungen in den Zugbändern für einen vollen Betriebszyklus

Die dynamische Analyse der Arbeit des Systems (einer Förderanlage) wurde mit Hilfe der dynamischen Verläufe von Verformungen durchgeführt, die aufgrund der tensometrischen Messungen der Tragkonstruktion des Schachtfördergefäßes am realen Objekt ermittelt wurden. Man registrierte die Anzeigen von Sensoren 7 - 7' und 8 - 8', die sich an den Messpunkten befanden, wie es auf **Bild 1** dargestellt wurde. Diese Sensoren wurden in solch einem System verbunden, das ermöglichte, die Verformungen zu eliminieren, die durch die Wirkung von Normalkräften in den Zugbändern verursacht wurden.

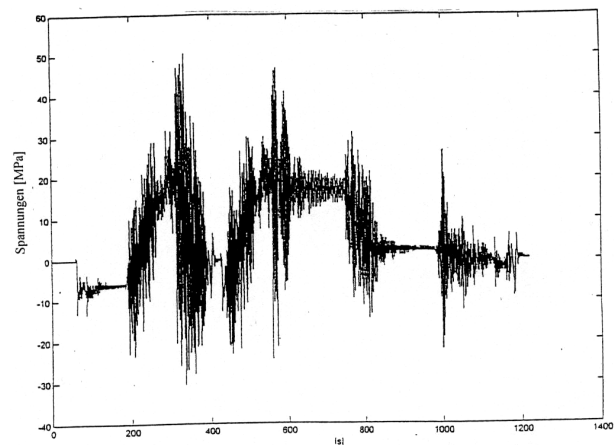


**Bild 1:** Lage der Messpunkte an der Konstruktion des Schachtfördergefäßes mit  $Q = 30$  Mg

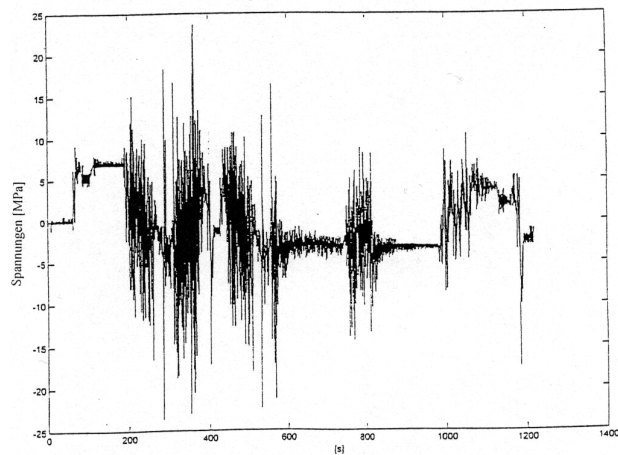
Beispiele für Verläufe der Veränderungen von Spannungen in die Richtung der größeren und kleineren Steifigkeit der Konstruktion des Schachtfördergefäßes wurden auf **Bild 2** und **Bild 3** dargestellt. Die Analyse wurde für die Einfahrt des Schachtfördergefäßes (nicht beladen) und für die Ausfahrt des mit der Ladung  $Q = 30$  Mg beladenen Schachtfördergefäßes durchgeführt. Sowohl für die Einfahrt als auch für die Ausfahrt des Schachtfördergefäßes wurden Perioden und Häufigkeiten der Schwingungen aufgrund der dynamischen Verläufe von Verformungen der ausgewählten Tragelemente der Konstruktion des Schachtfördergefäßes entsprechend für den Anfang und das Ende des Zyklus, ermittelt.

Die Häufigkeiten der Schwingungen wurden nach der früheren Bestimmung der Periode von Schwingungen aus den dynamischen Verläufen von Verformungen [1] [5] im entsprechenden Zyklus und für die entsprechende Ebene ermittelt, wobei man die Abhängigkeit:  $\omega = 2\pi/T$  nutzte.

Die Werte von Perioden und Häufigkeiten der Schwingungen für analysierte Ebenen und Betriebsphasen der Förderanlage wurden in der **Tabelle 1** zusammengestellt.



**Bild 2:** Verlauf der Veränderungen von Spannungen in die Richtung einer geringeren Steifigkeit p.p 7-7'



**Bild 3:** Verlauf der Veränderungen von Spannungen in die Richtung einer größeren Steifigkeit p.p 8-8'

**Tabelle 1:** Die auf Grund von tensometrischen Berechnungen ermittelten Perioden und Häufigkeiten von Schwingungen des Schachtfördergefäßes

| Ebene der Belastung<br>des<br>Schachtfördergefäßes |                                | Einfahrt |       | Ausfahrt |       |
|--|--------------------------------|----------|-------|----------|-------|
|  |                                | Anfang   | Ende  | Anfang   | Ende  |
| x - z  | T<br>[s]                       | 1,296    | 1,852 | 3,05     | 1,695 |
|  | $\omega$<br>[s <sup>-1</sup> ] | 4,848    | 3,393 | 2,09     | 3,707 |
| y - z  | T<br>[s]                       | 0,577    | 0,961 | 1,017    | 0,678 |
|  | $\omega$<br>[s <sup>-1</sup> ] | 10,889   | 6,538 | 6,178    | 9,263 |

### 3 Berechnungsmodell des Schachtfördergefäßes mit der Tragkraft von Q = 30 Mg

Das Berechnungsmodell des Schachtfördergefäßes wurde aufgrund der technischen Dokumentation M03- 2839 erstellt, wobei die Grunddimensionen der Konstruktion und Gewichte der einzelnen Elemente aufrechterhalten wurden.

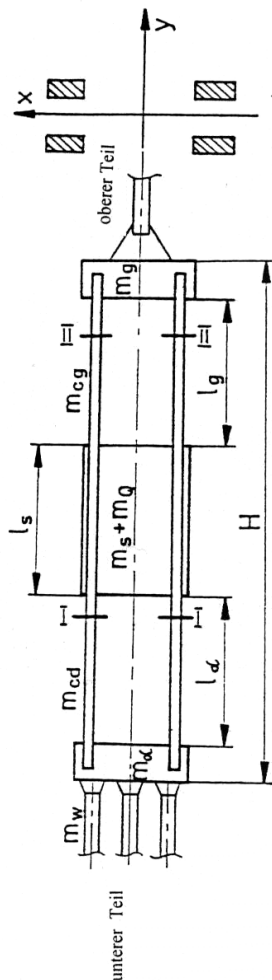
Das vorgeschlagene Berechnungsmodell des Systems zur Bestimmung der Häufigkeiten von Querschwingungen des Schachtfördergefäßes während seiner Bewegung im Förderschacht ist eine Rahmenkonstruktion, die auf **Bild 4** dargestellt wurde.

In diesem Modell gibt es folgende Elemente:

- Kopf des Schachtfördergefäßes mit Gewicht  $m_g$ ,
- der untere Rahmen mit Gewicht  $m_d$ ,
- Korb des Schachtfördergefäßes, Zugbänder, die den Kopf mit den unteren Rahmen mit Gewicht von  $m_s$  verbinden.

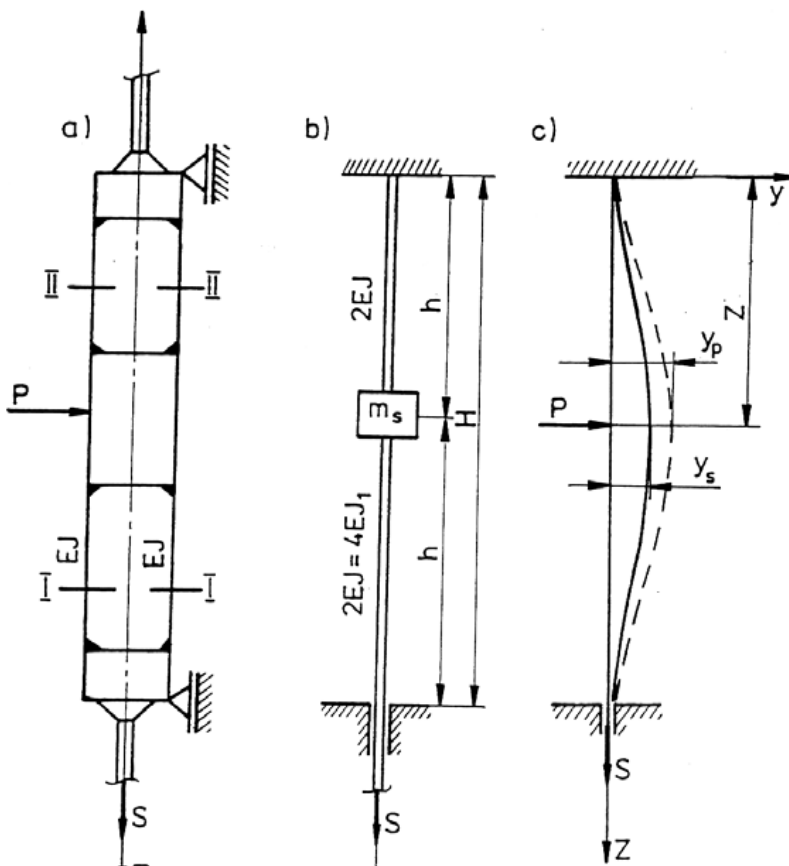
Das für die Analyse angenommene Rahmensystem mit drei Gewichten, wird zusätzlich durch die vom Gewicht der Ausgleichsseile und vom Gewicht des unteren Rahmens im unteren Teil des Modells (Schnitt I-II) auf dem Schema des Modells (Bild 4) kommende Kraft gedehnt, und zusätzlich mit dem Gewicht des Korbs des Schachtfördergefäßes und der Zugbänder im oberen Teil des Modells (Schnitt II-II) auf dem Schema des Modells (Bild 4).

Für die Ermittlung von Querbewegungen des Gefäßes während seiner Bewegung im Förderschacht hat man die angenommene Struktur des Modells zusätzlich vereinfacht. Man hat die Masse des Kopfes und auch die Masse des unteren Rahmens als vollständig steif betrachtet und außerdem hat man diese Massen fest mit Zugbändern verbunden. Es wurde angenommen, dass das Trägheitsmoment des Querschnitts der Konstruktion der Summe von Trägheitsmomenten der einzelnen Zugbänder gleich ist.



**Bild 4:** Berechnungsmodell der Konstruktion des Schachtfördergefäßes mit  $Q = 30 \text{ Mg}$

#### 4 Die Festlegung des Einflusses der Kräfte,



#### die die Konstruktion des Schachtfördergefäßes dehnen, auf die Häufigkeit der Querschwingungen des Systems.

Die Analyse des Einflusses der Kräfte, die die Konstruktion des Schachtfördergefäßes dehnen, auf die Häufigkeit der Querschwingungen des Systems, wurde mit Hilfe des vorgeschlagenen Modell des Systems durchgeführt, das auf Bild 5 dargestellt wurde. Die die Konstruktion des Schachtfördergefäßes dehrende Kraft kommt vom Gewicht der Ausgleichsseile, die um das Gewicht des unteren Rahmens vergrößert werden (Schnitt I-I (Bild 5)) und zusätzlich um das Gewicht des Korbes des Schachtfördergefäßes und der Zugbänder (Schnitt I-I (Bild 5a)).

**Bild 5:** Modell des Systems (das den Einfluss von Achsenkräften berücksichtigt) zur Ermittlung der Häufigkeiten von Querschwingungen des Schachtfördergefäßes

Die Dehnungskraft  $S$  führt zur Minderung des Wertes des die Konstruktion des Schachtfördergefäßes biegenden Moments, es betrifft auch die Zugbänder. Der Anteil des von der Kraft  $S$  kommenden Moments, im Gesamtwert des Moments in den Elementen der Konstruktion des Schachtfördergefäßes wurde – aus praktischen Gründen – annäherungsweise ermittelt. Die Linie der Biegung der Konstruktion des Schachtfördergefäßes nimmt man als die Kosinusfunktion seiner Länge. Für den Fall der Seitenbelastung nimmt es die Gestalt an:

$$y_p \cong \frac{f_p}{2} \left( 1 - \cos \frac{2\pi z}{H} \right)$$

wobei:  $f_p$  – maximale Biegung, die durch Seitenbelastung hervorgerufen wird,

$H$  – die Höhe des Schachtfördergefäßes (Entfernung des Kopfes vom unteren Rahmen)

Die Abhängigkeit (1) gilt für folgende Randbedingungen:

$y_p = 0$  für  $z = 0$  und  $z = H$ ,

$$y_p = f_p \text{ für } z = H/2$$

Die Biegung der Konstruktion des Schachtfördergefäßes, die durch Druckkraft (Dehnungskraft)  $S$  hervorgerufen wird, nimmt die Gestalt an, die man mittels der Kosinusfunktion darstellen kann:

$$y_s \cong \frac{f_s}{2} \left( 1 - \frac{\cos 2\pi z}{H} \right) \quad (2)$$

mit folgenden Randbedingungen:

$$y_s = 0 \text{ für } z = 0 \text{ und } z = H,$$

$$y_s \cong f_s \text{ für } z = H/2$$

wo:  $f_s$  – maximale Biegung, die durch gleichzeitige Wirkung der Seitenbelastung und der Dehnungskraft  $S$  hervorgerufen wird.

Das gesamte Biegemoment ist die Summe des Biegemoments, das von der Kraft  $S$  kommt, und des Moments, das von Querbelastrungen kommt (Bild 5c).

$$M_{g(z)} = M_{(z)} - S \cdot y_s \quad (3)$$

Die Differenzialgleichung der Biegelinie, die durch die Seitenbelastung des Balkens, wie auf Bild 5c hervorgerufen wird, ergibt [6]:

$$\frac{d^2 y_{p(z)}}{dz^2} = -\frac{M_{(z)}}{EJ} \quad (4)$$

Hingegen bei der gleichzeitigen Wirkung der Kraft  $S$  und der Querbelastrung gibt es:

$$\frac{d^2 y_{s(z)}}{dz^2} = -\frac{M_{(z)}}{EJ} + \frac{S \cdot y_s}{EJ} \quad (5)$$

Nach dem man den Wert  $M(z)$  aus (4) in (5) eingesetzt hat und Abhängigkeiten (1) und (2) berücksichtigt, bekommt man

$$(f_s - f_p) \frac{d^2}{dz^2} \left( 1 - \cos \frac{2\pi z}{H} \right) = \frac{S}{EJ} f_s \left( 1 - \cos \frac{2\pi z}{H} \right) \quad (6)$$

Nach der Durchführung der festgelegten Operationen gibt es

$$(f_s - f_p) \frac{4\pi^2}{H^2} \cos \frac{2\pi z}{H} = \frac{S}{EJ} f_s \left( 1 - \cos \frac{2\pi z}{H} \right). \quad (7)$$

Für die maximale Biegung bei  $z = \frac{H}{2}$  gibt es

$$\cos \frac{2\pi z}{H} \Big|_{z=\frac{H}{2}} = -1.$$

Der Wert der Biegung im Inneren der Konstruktion des Schachtfördergefäßes bei der Wirkung der Seitenbelastung und der Dehnungskraft beträgt:

$$f_s = \frac{f_p}{\frac{SH^2}{2EJ\pi^2} + 1} \quad (8)$$

Von der Abhängigkeit (8) kann man die von der Seitenbelastung und Dehnungskraft  $S$  kommende Biegung errechnen, was ermöglicht, die Häufigkeit der Querschwingungen des Schachtfördergefäßes zu berechnen.

Die Verschiebung der Masse  $m$  (Bild 5) auf der Seitenrichtung ist [6] gleich.

$$f_s = \frac{\frac{PH^3}{192EJ}}{\frac{SH^2}{EJ2\pi^2} + 1}, \quad (9)$$

wobei  $P$  – Seitenbelastung des Schachtfördergefäßes

$S$  – Kraft, die die Konstruktion des Schachtfördergefäßes dehnt und von Gewichten des Ausgleichsseils, des Hängezeugs und der unteren Bühne, von Gewichten der Zugbänder und Ladung (je nach der Lage des Gefäßes im Förderschacht) kommt,

$EJ$  – Biegesteifigkeit,

$H$  – Entfernung des Kopfes vom unteren Rahmen.

Deshalb ist der Koeffizient der Steifigkeit der Schachtfördergefäßkonstruktion in der Seitenrichtung [6] gleich.

$$k = \frac{P}{f_s} = \frac{192EJ}{H^3} \left[ \frac{S^2 H^2}{2EJ\pi^2} + 1 \right] \quad (10)$$

Hingegen beträgt die Häufigkeit der Schwingungen des Schachtfördergefäßes in der analysierten Richtung:

$$\omega = \sqrt{\frac{k}{m}} = \sqrt{\frac{192EJ}{mH^3} \left[ \frac{S^2 H^2}{2EJ\pi^2} + 1 \right]} \quad (11)$$

wobei:  $m = m_s + m_q$  – Masse des Schachtfördergefäßes und Masse der Ladung (für die Förderung der Förderguts), oder für  $m = m_s$  – Masse des Schachtfördergefäßes bei der Einfahrt des leeren Gefäßes.

Die Häufigkeit der Schwingungen im Schnitt I - I (Stelle, wo die Sensoren aufgeklebt wurden), wurde aus folgenden Abhängigkeiten ermittelt:

$$\omega_x = \sqrt{\frac{192 EJ_x}{mH_x^3} \left[ \frac{S^2 H_x^2}{2 EJ_x \pi^2} + 1 \right]} \quad (11a)$$

in der Seitenrichtung x (bei der geringeren Steifigkeit des Systems) und

$$\omega_y = \sqrt{\frac{192 EJ_y}{mH_y^3} \left[ \frac{S^2 H_y^2}{2 EJ_y \pi^2} + 1 \right]} \quad (11b)$$

in der Seitenrichtung y (bei der größeren Steifigkeit des Systems), und dann in der Tabelle 3 zusammengestellt.

$J_x, J_y$  – Trägheitsmomente des Schnitts von Zugbändern im Verhältnis zu der Achse x und z,

$H_x, H_y$  – Entfernung der Führungsschuhe in die Richtung der kleineren und größeren Steifigkeit des Schachtfördergefäßes.

Die Häufigkeitsberechnungen wurden für das Schachtfördergefäß mit  $Q = 30\text{Mg}$  durchgeführt, dessen geometrische Parameter und Belastungen in der **Tabelle 2** zusammengestellt wurden.

Die auf analytischem Wege ermittelten Häufigkeitswerte entsprechen den Werten der Häufigkeit von Systemschwingungen, die aufgrund des durchgeführten Experiments ermittelt wurden, was die Richtigkeit der angenommenen Voraussetzungen bestätigt, dass die Struktur des Modells vereinfacht werden kann. Also sollen die Parameter des Systems: Einstrich – Führung – Gefäße so angepasst werden, dass sich die Häufigkeit der Eigenschwingungen des Systems nicht mit der ermittelten Betriebshäufigkeit decken würde, was das System vor der Resonanz schützen wird.

**Tabelle 2:**

Geometrische Dimensionen und Belastungen des Schachtfördergefäßes  $Q = 30\text{ Mg}$

| Schnitt                     | I – I | II – II |
|-----------------------------|-------|---------|
| $J_x$<br>[cm <sup>4</sup> ] | 162   | 225     |
| $J_y$<br>[cm <sup>4</sup> ] | 5832  | 15625   |

|               |          |               |        |         |
|---------------|----------|---------------|--------|---------|
| <b>S [kN]</b> | Einfahrt | $H_x$<br>[cm] | 1626   | 1626    |
|               |          | $H_y$<br>[cm] | 1486   | 1486    |
|               | Ausfahrt | Anfang        | 615,00 | 775,00  |
|               |          | Ende          | 70,00  | 230,00  |
| <b>m [kg]</b> | Einfahrt | Anfang        | 70,00  | 530,00  |
|               |          | Ende          | 615,00 | 1075,00 |
|               | Ausfahrt |               | 15000  | 15000   |
|               |          | $m_s + m_Q$   | 45000  | 45000   |

**Tabelle 3:** Werte der für das angenommene Modell ermittelten Häufigkeiten

| Ebene der Belastung des Schachtfördergefäßes |                                | Leer (Einfahrt) |      | Voll (Ausfahrt) |      |
|--|--------------------------------|-----------------|------|-----------------|------|
|  |                                | Anfang          | Ende | Anfang          | Ende |
| <b>x - z</b>                                 | $\omega$<br>[s <sup>-1</sup> ] | 5,08            | 2,08 | 1,2             | 2,93 |
| <b>y - z</b>                                 | $\omega$<br>[s <sup>-1</sup> ] | 12,4            | 11,4 | 6,57            | 7,14 |

## 5 Zusammenfassung

Die oben dargestellten Überlegungen lassen feststellen, dass das vorgeschlagene Berechnungsmodell der Konstruktion des Schachtfördergefäßes eine gute Annäherung des realen Objekts ist. Der Vergleich der Häufigkeit von Schwingungen des realen Systems (Tabelle 1), mit Häufigkeiten, die für das vorgeschlagene Berechnungsmodell ermittelt wurden (Tabelle 3), bestätigen, dass die angenommenen Voraussetzungen richtig sind.

Indem man also das vorgeschlagene Modell benutzt, kann man innere Kräfte in den Schnitten von Zugbändern, sowie auch die Kräfte der Seitenwirkungen ermitteln, was das Thema weiterer Arbeiten in diesem Bereich sein wird.

## Literatur

- [1] CICHOCI•SKI A., DZIK S., WOLNY S.:  
Eksperymentalne badania stanu napr••enia  
w wybranych elementach no•nych



- (ci•gnach) konstrukcji górniczych naczynia wydobywczego. XIX Sympozjum Mechaniki Eksperymentalnej Ci•a Sta•ego. Warszawa 2000.
- [2] WOLNY S., ROSNER Z.: Obci••enia dynamiczne w eksploatacji górniczych urz•dze• wyci•gowych. XI Konferencja Naukowa. Problemy Rozwoju Maszyn Roboczych. Zakopane 1998, s. 429 ÷ 436.
- [3] WOLNY S., DZIK., ROSNER Z.: Ca•kowite obci••enie dynamiczne zawiesze• w pojedynczym cyklu eksploatacyjnym urz•dzenia wyci•gowego. ZN AGH „Mechanika” Nr 3, 1999, s. 395 ÷ 403.
- [4] WOLNY S., CICHOCI•SKI A., DZIK S. i inni: Praca Naukowo-badawcza pt. „Opracowanie kryteriów oceny konstrukcji no•nej naczy• górniczych wyci•gów szybowych w aspekcie przed•u•enia okresu bezpiecznej eksploatacji. Katedra Podstaw Budowy i Eksploatacji Maszyn AGH. Kraków 1999.
- [5] WOLNY S., DZIK S., CICHOCI•SKI A.: Opracowanie kryteriów oceny konstrukcji no•nej naczy• górniczych wyci•gów szybowych w aspekcie przed•u•enia okresu bezpiecznej ich eksploatacji. Zak•ad Wytrzyma•o•ci Materia•ów i Konstrukcji. Cz. 2. AGH, Kraków 2000.
- [6] WOLNY S., SIEMIENIEC.: Wytrzyma•o•• materia•ów. Cz. I. Teoria, Zastosowanie. Wyd. AGH. Kraków. 2000.
- [7] P•ACHNO M.: Zagadnienie drga• poprzecznych naczy• wyci•gowych. ZN Pol. •I., Mechanika z. 113, Gliwice 1989.
- [8] P•ACHNO M.: Zagadnienia wp•ywu dynamiki prowadzenia szybowego na bezpiecze•stwo eksploatacji naczy• wyci•gowych. Bezpiecze•stwo Pracy w Górnictwie, nr 4(81), 1988.
- [9] P•ACHNO M., ROSNER Z.: Mo•liwo•ci wczesnego wykrywania procesów zm•czeniowych w ci•gach naczy• górniczych. Bezpiecze•stwo Pracy i Ochrona •rodowiska w Górnictwie. Miesi•cznik WUG. Wydanie specjalne, Katowice 1997.
- [10] P•ACHNO M.: Metoda pomiaru i analizy drga• poprzecznych naczy• wyci•gowych przydatna do wyznaczania rzeczywistych obci••e• tych naczy• oraz zbroje• szybowych. Zeszyty Naukowo-Techniczne Katedry Transportu Linowego AGH. Zeszyt nr 15. Kraków 1999.
- [11] P•ACHNO M.: Mo•liwo•ci oceny bezpiecze•stwa naczy• i zbroje• szybowych metod• analizy drga• poprzecznych, zmiennych przy naczyniach. Zeszyty Naukowo-Techniczne Katedry Transportu Linowego AGH. Zeszyt nr 15. Kraków 1999.
- [12] TEJSZERSKA D., SWITO•SKI E.: Modelowanie zjawisk dynamicznych w uk•adach wyci•gowych. Mi•dzynarodowa Konferencja Naukowo-Techniczna. Gliwice 1996.
- [13] TEJSZERSKA D., WOJNAROWSKI J.: Symulacja metody wyznaczania si• dynamicznych wielolinowych uk•adach wyci•gowych. Mat. III Konferencji „kierunki Rozwoju Górniczych Urz•dze• Wyci•gowych”. Z. 4, AGH, Kraków 1984.



## Technische Ausrüstung, Kooperationsangebote und Forschungsschwerpunkte des Institutes

### Institut

Die Lehre, Ausbildung, Forschung und Entwicklung am Fritz-Süchting-Institut für Maschinenwesen (IMW) deckt folgende Bereiche ab:

- Konstruktion und Berechnung von Maschinenelementen und Maschinenteilen
- Konstruktionssystematik
- Rechneinsatz im Maschinenbau
- Konstruktion verfahrenstechnischer Maschinen
- Maschinenakustik
- Experimentelle Beanspruchungsermittlung und Spannungsoptik
- Technische Normung
- Rapid Prototyping / Rapid Tooling

Das interdisziplinäre Team am IMW besteht aus ca. 20 wissenschaftlichen Mitarbeitern/-innen aus den Bereichen Maschinenbau, Verfahrenstechnik, Informatik, Mathematik, Geologie und Geophysik. Weitere 11 Mitarbeiter/-innen und 8 Auszubildende arbeiten in der Verwaltung, mechanischen und elektrotechnischen Werkstatt.

### Technische Ausrüstung

Für die entsprechenden Forschungsschwerpunkte verfügt das IMW über gut ausgestattete Labore (Spannungsoptik, Akustik, CIM), verschiedene maschinentechnische Prüfstände und die notwendige Rechnerausrüstung.

Die Untersuchung von Maschinenelementen kann auf zwei hydraulischen Verspannprüfständen, einem Torsions-Schwingprüfstand, einem Umlaufbiege- und Torsionsprüfstand, einer statischen Verspanneinrichtung sowie einer separaten Umlaufbiegeprüfeinrichtung durchgeführt werden. Zur Prüfung fördertechnischer Elemente und Anschlagmittel ist eine Zugprüfmaschine mit integriertem Querprüfgerät und ein Seiltrommelprüfstand vorhanden. Eventuelle berührungslose Übertragungen von Messwerten werden mit einer 64 Kanal Telemetrieinrichtung bewältigt. Ein Schleuderprüfstand für schnell drehende Maschinenteile (z.B. Rotoren, Abweiseradwindsichter), ein Prüfstand für Feinprallmühlen und eine Reaktionsschwingmühle

ergänzen die Prüfeinrichtungen des IMW für Untersuchungen an verfahrenstechnischen Maschinen.

Das Labor für statische Spannungsoptik verfügt über Einrichtungen und Werkstattinfrastruktur für spannungsoptische Untersuchungen an Bauteilmodellen von mikroskopischer Größe bis zu einer Größe von ca. 1 m. Die hierzu zum Teil notwendige eigenspannungsarme Bearbeitung von Modellmaterialien werden von der Institutswerkstatt ebenso sachkundig ausgeführt wie die aufgabenspezifische Anfertigung von Belastungseinrichtungen. Die technische Ausstattung des Labors für dynamische Spannungsoptik ermöglicht Messungen an hochfrequent belasteten Bauteilen. Mittels eines elektrodynamischen Schwingerregers können Bauteile gezielt frequenzselektiven Belastungen bis zu einer Frequenz von 4 kHz unterworfen werden. Der Einsatz optischer Ganzfeldmessverfahren ermöglicht darüber hinaus auch die Visualisierung sich einstellender Beanspruchungszustände, wie sie bei Stoßanregungen auftreten.

Das Akustiklabor am IMW ist mit umfangreichem Messequipment sowie einem schallarmen Raum zur Erfassung und Auswertung des von Maschinenstrukturen abgestrahlten Schalldruck- und Schalleistungspegels ausgestattet. Neben Schmalbandanalysen mittels eines FFT-Analysators bietet ein verfügbarer Bandpassfilter die Möglichkeit der Terz- und Oktavanalyse. Mittels eines Handschallpegelmessers können auch schnelle Vorortmessungen durchgeführt werden.

Das CIM-Labor besteht aus zwei 4-Achsen-Fräsmaschinen (MAHO MH700S/MH600), einer Drehmaschine (Monforts MNC 5), einer Senkerodiermaschine (CHARMILLER ROBOFORM 505) mit 3D-Bahnsteuerung, und einer ZEISS Koordinatenmessmaschine mit NC-Rundtisch. Zur CAM-Lösung der Firma DLoG gehören ein werkstattorientiertes NC-Programmiersystem, Einrichtungen zur Direktübertragung von NC-Programmen an die Maschinensteuerungen und Anwendungen zur Maschinen-/Betriebsdatenerfassung sowie zur Maschinenzustandsanzeige. Als CAD/CAM-System wird SolidWorks und Pro/Engineer mit

Pro/Manufacturing eingesetzt. Maschinenspezifische Postprozessoren erlauben eine durchgängige CAD/NC-Verfahrenskette. Als PDM-System kommt axalant™ von EIGNER auf einer ORACLE8i-Datenbank zum Einsatz.

Die Rechnerausstattung umfaßt mehrere Server, welche die insgesamt ca. 130 Rechner des Institutes vernetzen. Diese umfassen u.a. verschiedene Internetserver (WWW/FTP), einen Windows NT Server, einen Server für Datenbankdienste und einen Abteilungsserver SUN Enterprise 450 zum Betrieb der 60 SUN Workstations. Als Standardsoftware stehen eine Vielzahl von Programmen zur Verfügung, u. a. die CAD-Pakete ProEngineer und SolidWorks sowie die FEM-Programme MARC/MENTAT, MARC/MSC.PATRAN und ProMechanica. Zur rechnerintegrierten Produktentwicklung steht ein Intergraphcomputer auf Intel-Architektur mit zugehöriger VR-Software zur Verfügung.

Das Institut für Maschinenwesen verfügt über eine vollständige Rapid Prototyping bzw. Rapid Tooling Verfahrenskette zum Lasersintern von metallischen Bauteilen. Hierzu gehören im Einzelnen eine Rapid Tooling Anlage EOSINT M 250 der Firma EOS, zum Generieren von Prototypen, Funktionsteilen und Werkzeugen (Formen und Elektroden), verschiedene Konstruktionsarbeitsplätze (ProE, SolidWorks, CATIA V5), Software zur Rapid Tooling gerechten Aufbereiten der CAD-Daten (Magics RP), Apparaturen und Geräte zum Infiltrieren und Beschichten der Sinterbauteile mit Harzen und niedrig schmelzenden Metallen, eine Sandstrahlkabine für verschiedene Strahlmedien (Stahlkugeln, Keramikpulver, Nussgranulat usw.) sowie Arbeitsplätze zur manuellen Nachbearbeitung der Rapid Tooling Erzeugnisse.

### Kooperationsangebote

Das IMW arbeitet in einer Vielzahl von Projekten in enger Kooperation mit namhaften Industrieunternehmen in allen Tätigkeitsbereichen zusammen:

#### *Entwicklung, Konstruktion und Fertigung*

- Entwicklung neuer Konstruktionen (z.B. Prüfstände und Mühlen),
- Gestaltung von Maschinenelementen und Maschinenteilen,

- Fertigungsmöglichkeiten für Prüfkörper und Nullserien,
- Softwareentwicklung zur Simulation und Optimierung von Fertigungsverfahren und zur Unterstützung des Konstruktionsprozesses.
- Konstruktion und Herstellung von metallischen Formen, Funktionsteilen und Prototypen durch direktes Lasersintern (Rapid Tooling).

#### *Versuche, Messungen und Berechnungen*

- Durchführung von komplexen Festigkeitsberechnungen und -nachweisen mit Hilfe der FEM (2D/3D),
- Erarbeitung von Berechnungsansätzen für Maschinenelemente
- Schadensfallanalysen
- Vermessung und Qualitätskontrolle auf der Koordinatenmessmaschine,
- DMS-Messungen unter Betriebsbedingungen an Maschinenteilen,
- Durchführung von maschinenakustischen Untersuchungen und Optimierungen,
- Durchführung von Verschleiß- und Festigkeitsuntersuchungen auf den Prüfständen.

#### *Beratung und Gutachten*

- Beratung, Untersuchung und Erstellung von Gutachten zur Bauteilfestigkeit,
- Beratung, Untersuchung und Gutachten zur Konstruktion lärmarmen Maschinen,
- Beratung zu Konstruktions- und Patentfragen,
- Beratung und Hilfestellung bei der Beantragung und Durchführung von nationalen und internationalen Forschungsprojekten.

Durch die interdisziplinäre Zusammensetzung werden im Institut auch Entwicklungsprojekte für komplette Maschinen und Steuerungen durchgeführt. Die Zusammenarbeit kann auch über Praktika, Studien- und Diplomarbeiten erfolgen.

Neben den oben aufgeführten Angeboten bietet das Institut für Maschinenwesen interessierten Forschungseinrichtungen und Industrieunternehmen, insbesondere kleinen und mittleren Unternehmen, Beratungen zu den europäischen Förderungsmaßnahmen an. Dies beinhaltet neben der Beratung zur Einwerbung von Fördermitteln auch Hilfestellung bei der Vorbereitung, der Durchführung und der

Partnersuche bei europäischen  
Forschungsprojekten.

## Forschungsschwerpunkte

Die Forschungsschwerpunkte gliedern sich in folgende Bereiche:

### *Konstruktion und Berechnung von Maschinenelementen*

Neben allgemeinen Fragen der Grundlagen des Maschinenwesens wie Beanspruchungsermittlung, Reibung, Verschleiß und Tragfähigkeit stehen folgende Maschinenelemente besonders im Vordergrund:

- Zahn- und Keilwellen-Verbindungen,
- Spielbehaftete Längsstift-Verbindungen,
- Innenhochdruckgefügte und konventionelle Preßverbindungen mit geometrischen Schwächungen (z.B. Axial- oder Radialbohrungen in Welle und/oder Nabe),
- Torsionssteife Doppelmembrankupplungen mit Ausgleichsfunktion in radialer und axialer Richtung,
- Seiltrommeln (ein- und mehrlagig bewickelt),
- Stahldrahtseile,
- Bolzen-Lasche Verbindungen,
- Verbindungstechnik Metall-Keramik bei hohen Temperaturen,
- Verbindungselemente unter hohen mechanischen und thermischen Belastungen.

Weitere Forschungsprojekte beschäftigen sich mit der Beanspruchungsanalyse und Optimierung stoßbelasteter Maschinenteile, mit der elasto-plastischen Beanspruchung von Maschinenelementen und der Entwicklung von Berechnungssoftware für Maschinenelemente.

### *Konstruktionssystematik und Rechnereinsatz im Maschinenbau*

Die Entwicklung von Konstruktionsinformationssystemen zur Unterstützung des Produktentwicklers unter Einbeziehung aller Produktlebensphasen sind Gegenstand verschiedener Forschungsprojekte. Als Grundlage für ein phasenübergreifendes Arbeiten stehen insbesondere die Entwicklung von Schnittstellen und der Produktdatenaustausch (STEP ISO 10303/ISO 15926) im Vordergrund. Weitere Projekte beschäftigen sich mit:

- dem Management kooperativer Produktentwicklungsprozesse,
- dem Qualitätsmanagement in der Konstruktion,

- der Werkstoffauswahl in der Konstruktion,
- der Simulation, Berechnung und Optimierung von kinematisch komplexen Fertigungsverfahren (Zahnkantenabdachungen, Wirbelfräsen),
- Fehlermöglichkeitseinfluss- und Störfallanalysen,
- dem fertigungsgerechten Konstruieren insbesondere an Bauteilen aus Feinblech.

### *Konstruktion verfahrenstechnischer Maschinen*

Schwerpunkt der Untersuchungen und Entwicklungen von verfahrenstechnischen Maschinen unter besonderen mechanischen, chemischen und thermischen Belastungen sind:

- Entwicklung von Reaktionsmühlen,
- Untersuchung der Zusammenhänge beim Prallmahlen,
- Gestaltung schnell laufender Rotoren (Windsichter/Prallmühlen),
- chemisches Recycling von Kunststoffen,
- Niedertemperaturrauchgasentschwefelung,
- Entwicklung lärmarmen, schnell laufender Mühlen.

Weitere Forschungsvorhaben beschäftigen sich mit KI-Systemen und der Konstruktionssystematik an Maschinen der Verfahrenstechnik und der Baureihenentwicklung.

### *Maschinenakustik*

Im Rahmen der Maschinenakustik werden Forschungsarbeiten zur Lärminderung von Bauteilen und Maschinensystemen durchgeführt. Für experimentelle Untersuchungen und Entwicklungen zu Körperschall, Schallemission und Körperschallimpedanz- und Dämpfungselementen steht entsprechende Messwerterfassungs- und Verarbeitungshard- und -software zur Verfügung. Ein weiterer Schwerpunkt bildet die Entwicklung von Konstruktionssystematiken und von Beratungssystemen zur Konstruktion lärmarmen Maschinen.

### *Rapid Prototyping / Rapid Tooling*

Die Forschungs- und Entwicklungstätigkeiten auf dem Gebiet Rapid Prototyping / Rapid Tooling umfassen die gesamte Rapid Tooling Verfahrenskette.

Hierzu zählt im einzelnen:

- die Rapid Tooling gerechte CAD-Konstruktion,
- die Datenaufbereitung für den Sinterprozess,

- der Rapid Tooling Bauprozess einschließlich Untersuchungen der Sinterparameter und Sinterwerkstoffe und
- die Nachbearbeitung bzw. das Finishen der Sinterbauteile durch Beschichten und Infiltrieren.

Weiterhin werden die Anwendungsgebiete der Rapid Tooling Technologie betrachtet wie z. B. die Herstellung von Elektroden für das funkenerosive Abtragen und das Sintern von Formen für den Gummi- und Kunststoffspritzguss oder Faserverbundkonstruktionen sowie das Generieren von Funktions- und Einsatzteilen mittels neu entwickelter Sinterwerkstoffe und Sinterstrategien.



## Veröffentlichungen des Institutes seit dem 1.1.1997

### Veröffentlichungen 1997

Dietz, P.; Kruse, P.J.; Leschonski, K.: Behandlung von Anforderungen in der Entwicklung verfahrenstechnischer Prozesse, Maschinen und Anlagen. Konstruktion, Heft 1/2, Januar 1997

Dietz, P.; Penschke, St.; Ort, A.: Ansätze zur parallelen Gestaltung von Produkten und Fertigungsprozessen. VDI Berichte 1322

Dietz, P.; Ort, A.: The Use of ISO 13584 Methodology for Building Part Hierarchies in Practice. European Conference Product Data Technology Days, 15.-16.4.1997, Sophia Antipolis

Dietz, P.; Penschke, St.; Ort, A.: Strategies for Product Knowledge Management and Feedback to Design - Application Examples. Workshop Product Knowledge Sharing and Integration, 17.-18.4.1997, Sophia Antipolis

Dietz, P.; Ort, A.; Penschke, St.: Perspectives on Design Support Strategies. IIM '97 European Conference on Integration in Manufacturing, 24.-26.9.1997, Dresden

Jakel, R.: Ein Beitrag zur Berechnung und konstruktiven Gestaltung keramischer Bauteile, angewendet am Beispiel eines keramischen Heißgasventilatorrades. Dissertation, TU Clausthal 1996.

Haje, D.: Entwicklung eines Informationssystems zur Konstruktion lärmarmen Produkte. Dissertation, TU Clausthal 1996, Lärmarm konstruieren XVII, Schriftenreihe der Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin, Forschung Fb 768 Arbeitsschutz, Bremerhaven: Wirtschaftsverlag NW

Wesolowski, K.: Dreidimensionale Beanspruchungszustände und Festigkeitsnachweis drehmomentenbelasteter Zahnwellen-Verbindungen unter elastischer und teilplastischer Verformung. Dissertation, TU Clausthal 1996, VDI Fortschritt-Berichte Reihe 1: Konstruktionstechnik/Maschinenelemente Nr. 286, Düsseldorf: VDI Verlag

Dietz, P.; Burgtorf, U.: Das Beanspruchungsverhalten von Zahnwellenverbindungen mit Preßsitz. Abschlußbericht zum Forschungsvorhaben Nr. 250 der FVA, Würzburg 1997

Dietz, P.; Klemp, E.: SIMDES. European Workshop on Environmental Technologies 1997, 10.-12. Dezember 1997, Cranfield GB

Schiedeck, N.: Simulation und Optimierung kinematisch komplexer Fertigungsverfahren. Dissertation, TU Clausthal 1996.

### Veröffentlichungen 1998

Bönig, S.; Heimannsfeld, K.: A comparison of hazard analysis methods in plant design. 1st Internet Conference on Process Safety, Januar 1998

Dietz, P.; Ort, A.: The Concept of View in Parts Library – An Integrative Feature For The Design Process? European Conference Product Data Technology Days, 25./26.3.1998, Garston (Watford).

Dietz, P.; Ort, A.: Festlegungen für die optimale Merkmalerfassung und -organisation in einem Merkmallexikon. DIN Tagung "Merkmal-Lexikon in der Anwendung", 2.4.1998, Köln.

Dietz, P.; Wesolowski, K.; Burgtorf, U.; Garzke, M.: Betriebszustände und Tragfähigkeitsnachweis von Zahn- und Keilwellen-Verbindungen. VDI-Tagung "Welle-Nabe-Verbindungen", 28./29.4.1998 Fulda VDI Berichte 1384

Dietz, P.; Tan, L.; Garzke, M.: Übertragungsfähigkeit und elastisch-plastische Auslegung geschwächter Welle-Nabe-Preßverbindungen. VDI-Tagung "Welle-Nabe-Verbindungen", 28./29.4.1998 Fulda, VDI Berichte 1384

Burgtorf, U.; Dietz, P.; Garzke, M.: Calculation of Involute Splines under Elastic Material Behaviour. 5th International Design Conference DESIGN '98, 19.-22.5.1998, Dubrovnik/Kroatien.

Garzke, M.; Dietz, P.; Tan, L.; Schäfer, G.: Transmission capabilities and elastic design of weakened shaft-hub shrink fits. 5th International Design Conference DESIGN '98, 19.-22.5.1998, Dubrovnik/Kroatien.

Ort, A.; Dietz, P.: Parts Library: An Application of Meta-Modelling in Design. 5th International Design Conference DESIGN '98, 19.-22.5.1998, Dubrovnik/Kroatien.

Dietz, P.; Penschke, S.; Ort, A.: Strategic Reuse of Product Data for Design. 5th International Design Conference DESIGN '98, 19.-22.5.1998, Dubrovnik/Kroatien.

Garzke, M.: Abschlußbericht zum DFG-Vorhaben "Statische und dynamische Beanspruchbarkeit von Zahnwellen-Verbindungen unter elastischem und teilplastischem Werkstoffverhalten", Di 289 / 9-2; Institut für Maschinenwesen, TU Clausthal, Mai 1998.

Gieleßen, H.: Optische Anisotropie von texturiertem Silberchlorid. Dissertation, TU Clausthal 1997.

Dietz, P.; Ort, A.: Knowledge Representation in Design Using Parts Library. ProStep Science Days, 17./18.6.1998, Wuppertal.

Penschke, S.: Erfahrungswissen in der Produktentwicklung. Dissertation, TU Clausthal 1998.

Schmidt, A.: Experimentelle und theoretische Untersuchungen zur konstruktiven Einflußnahme auf die Körperschalleitung in ebenen Strukturen. Dissertation, TU Clausthal 1998.

Burgdorf, U.: Montage- und Betriebseigenschaften von Zahnwellen-Verbindungen mit Preßsitz. Dissertation, TU Clausthal 1998.

Heinen, F.: Entwicklung einer Methodik zur Rückfederungsvorhersage an Tiefziehteilen. Dissertation, TU Clausthal 1998.

Dietz, P.; Schäfer, G.; Garzke, M.: Elastisch-plastische Auslegung von Maschinenelementen. 2. Workshop Konstruktionstechnik, 24./25.9.98 Kühlungsborn, Institut für Konstruktionstechnik der Universität Rostock.

Dietz, P.; Schmidt, A.; Jeschke, D.: Berechnung von Terzspektren aus der FFT-Analyse. Zeitschrift für Wärme-, Klima-, Schall- und Brandschutz. 43. Jg., Heft 41

Pawar, K.S.; Ratchev, S.; Heimannsfeld, K.: Knowledge Acquisition and sharing for Requirement Engineering (KARE) in one-of-a-kind production environment: Initial Concepts, current and future development. Conference PROLAMAT, September 1998, Trento/Italien.

### Veröffentlichungen 1999

Festschrift zum 60. Geburtstag von Prof. Dr.h.c. Dr.-Ing. Peter Dietz. Institut für Maschinenwesen, TU Clausthal, Mai 1999.

Dietz, P.; Haje, D.: Entwicklung lärmarmen Produkte – Rechnergestützte Beratungshilfen für den Konstrukteur. Konstruktion 51 (1999), Heft 7/8.

Schmidt, A.: Untersuchungen zur konstruktiven Einflußnahme auf die Körperschalleitung in ebenen Strukturen. Konstruktion 51 (1999), Heft 7/8.

Dietz, P.: Tragfähigkeitssteigerungen von Maschinenelementen durch teilplastische Verformungen. Konstruktion 51 (1999), Heft 10.

Dietz P.; Grünendick T.: Reaktives Mahlen mit Hochleistungs-Schwingmühlen. Workshop Tribochemie/Reaktives Mahlen, 26.6.1999, DECHEMA e.V., Frankfurt

Dietz, P.; Käferstein, B.; Schmidt, A.: Optische Ganzfeldmeßmethoden und Analogiebildung zur Simulation der Körperschallausbreitung. VDI-Tagung "Maschinenakustik", 9./10.9.1999 Wiesloch, VDI Berichte 1491

Dietz, P.; Gummersbach, F.; Haje, D.: Entwicklung lärmarmen Produkte - Rechnergestützte Beratungshilfen für den Konstrukteur. VDI-Tagung "Maschinenakustik", 9./10.9.1999 Wiesloch, VDI Berichte 1491

Klemp, E.; Hickmann, T.: Rapid Tooling für Serienwerkzeuge? - Ein Test im Vergleich zu herkömmlichem Stahl. Der Stahlformenbauer 16 (1999), Heft 5.

Dignum, V.; Heimannsfeld, K.: Knowledge Management for requirements engineering. 12th Banff Knowledge Acquisition Workshop for knowledge-based systems, Volume 1, Banff, Canada, 1999

### Veröffentlichungen 2000

Schäfer, G.; Birkholz, H.; Garzke, M.: Numerische und experimentelle Untersuchungen zum Festigkeitsverhalten von Membrankupplungen. AiF-Abschlussbericht, Institut für Maschinenwesen, TU Clausthal, April 2000

Henschel, J.: Dimensionierung von Windentrommeln. Dissertation, TU Clausthal 1999.

Schäfer, G.; Dietz, P.: Strategies for the Design of Process Engineering Machines under special mechanical, thermal and chemical Conditions. 6th International Design Conference DESIGN 2000, 23.-26.5.2000, Cavtat/Dubrovnik, Kroatien.

Dietz, P.; Haje, D.: Development of low noise Products – Computer guidance for the Designer. 6th International Design Conference DESIGN 2000, 23.-26.5.2000, Cavtat/Dubrovnik, Kroatien.

Birkholz, H.; Dietz, P.; Dehner, E.; Garzke, M.: TWINTORS-Diaphragm couplings for turbo machines. 6th International Design Conference DESIGN 2000, 23.-26.5.2000, Cavtat/Dubrovnik, Kroatien.

Garzke, M.; Dietz, P.: Torque transmission capability of internal high pressure assembled press fits. 6th International Design Conference DESIGN 2000, 23.-26.5.2000, Cavtat/Dubrovnik, Kroatien.

Otto, S.; Dietz, P.; Garzke, M.: Development of calculation basis for dimensioning axial pin connections with clearance. 6th International Design Conference DESIGN 2000, 23.-26.5.2000, Cavtat/Dubrovnik, Kroatien.

Ort, A.: Entwicklungsbegleitende Kalkulation mit Teilebibliotheken. Dissertation, TU Clausthal 1998.

Dietz, P.; Garzke, M.; Schellbach, J.: FEM-Analyse innenhochdruckgefügter Welle-Nabe-Verbindungen. 1. MSC-Technologie-Konferenz, 5./6.6.2000, Bad Kissingen.

Rouibah, K.; Schmitt, R.; Caskey, K.; Goltz, M.: The SIMNET Parameter Based Approach Eases Inter-Company Engineering Change Management. International Conference on Concurrent Enterprising – ICE 2000, 28.-30.6.2000, Toulouse.

Heimannsfeld, K.; Johnson, J.; Herzog, E.; Düsing, C.: Beyond Tool Exchange – Current Status and Future Implications of the Emerging ISO Standard AP233. 2<sup>nd</sup> European Conference on Systems Engineering (EuSEC 2000), Sept.2000, München.

Goltz, M.; Schmitt, R.: Product Data Controlled Workflow in the Supply Chain. ProSTEP Science Days 2000.

Goltz, M.; Schmitt, R.; Vanden Bossche, M.: Managing the Development and Engineering Changes of Complex Products in a Distributed Engineering Environment. eBusiness and eWork 2000. 18.-20. 10.2000, Madrid.

Dietz, P.; Tan, L.; Schäfer, G.; Garzke, M.: Elastisch-plastische Auslegung geschwächter Pressverbindungen. Seminar „Welle-Nabe-Verbindung: Preßverbindungen für höchste dynamische Belastungen“, VDI Bildungswerk, 24./25.10.2000, Chemnitz

Schmitt, R.: Unternehmensübergreifender Engineering Workflow - Verteilte Produktentwicklung auf der Grundlage eines parameterbasierten Daten- und

Prozeßmanagements. Dissertation, TU Clausthal 2000

### Veröffentlichungen 2001

Düsing, C.: The emerging ISO Standard STEP AP-233 - A key enabler for systems engineering across different domains. International Symposium on Systems Integration; Baden Baden; 2001

Düsing, C.: Neue Möglichkeiten der Produktentwicklung mit STEP - AP-233 3. Workshop Konstruktionstechnik; Rostock; 2001

Müller, N.; Trenke, D.: Rapid Prototyping und Rapid Tooling am Institut für Maschinenwesen, Begleitband zur Informationsveranstaltung, IMW, 02.02.2001, Clausthal-Zellerfeld

Trenke, D.: Die Rapid Tooling Verfahrenskette, Vortrag, 8. Fachausschuss der Deutschen Keramischen Gesellschaft, CUTEC, 10. Mai 2001, Clausthal-Zellerfeld

Trenke, D.: Anwendung von Rapid Prototyping und Rapid Tooling in der Produktentwicklung, Informationstechnologie - Grundlagen und Anwendungen, Tag der Forschung 2001, TU Clausthal, 25. Mai 2001, Clausthal-Zellerfeld

Mupende, I.: Beanspruchungs- und Verformungsverhalten des Systems Trommelmantel - Bordscheiben bei mehrlagig bewickelten Seiltrommeln unter elastischem und teilplastischem Werkstoffverhalten. Dissertation, TU Clausthal, Cuvillier Verlag Göttingen, 2001

Dietz, P.; Mupende, I.; Otto, S.: Der Einfluss des Rillungssystems auf die Bordscheibenbelastung Zeitschrift Fördern und Heben März 2001

Otto, S.: Bauelement zur Bewegungsumwandlung in Verbrennungsmotoren Kurbelschleife TU Contact Juni 2001

Wächter, M.: BLK-Projekt: Länderübergreifende Entwicklung und Erprobung integrierter modularer Studienangebote unter Einbeziehung informations- und kommunikationstechnischer Medien am Beispiel der Ingenieurwissenschaften, Abschlussbericht AP4 Internationalisierung, 2001

Dietz, P.; Tawil, M.: 3D-Produktmodellierung in der Entwicklungskette - Aufwand und Nutzen. VDI-

Tagung "Informationsverarbeitung in der Produktentwicklung 2001 - Effiziente 3D-Produktmodellierung - Fortschritte und Fallstricke", 19.-20. Juni 2001, Stuttgart - anlässlich CAT Engineering 2001

Heider, G.: Konstruktive Gestaltung von Steuerungen für Hochleistungskolbendampfmaschinen. Dissertation TU Clausthal 2001

Große, A.: Interdisziplinäre Werkstoffauswahl durch Aufbau eines Material Data Mart. Dissertation TU Clausthal 2001

Garzke, M.: Auslegung innenhochdruckgefügter Pressverbindungen unter Drehmomentbelastung. Dissertation, TU Clausthal, VDI Verlag 2001

Schäfer, G.: Betriebs- und Verschleißverhalten von Zahnwellen-Verbindungen. Seminar „Zahnwellenverbindungen und Pressverbindungen“, VDI Bildungswerk, 27./28.03.2001, Chemnitz

Schäfer, G.: Berichte aus der Praxis zur Fertigung von Zahnwellenverbindungen. Seminar „Zahnwellenverbindungen und Pressverbindungen“, VDI Bildungswerk, 27./28.03.2001, Chemnitz

Birkholz, H.: Die Auswahl der geeigneten Welle-Nabe-Verbindung - Längsstift-Verbindungen als Alternative? Seminar „Zahnwellenverbindungen und Pressverbindungen“, VDI Bildungswerk, 27./28.03.2001, Chemnitz

Dietz, P.; Garzke, M.: Numerische und experimentelle Untersuchungen an innenhochdruckgefügten Pressverbindungen unter Drehmomentbelastung, 3. Workshop Konstruktionstechnik, 20./21.09.2001 Rostock-Warnemünde

Schäfer, G.: Verschleißverhalten flankenzentrierter Zahnwellenverbindungen, 3. Workshop Konstruktionstechnik, 20./21.09.2001 Rostock-Warnemünde

Düsing, C.: Neue Möglichkeiten der Produktentwicklung mit STEPP - AP-233, 3. Workshop Konstruktionstechnik, 20./21.09.2001 Rostock-Warnemünde

Dietz, P.; Grünendick, T.: Bauteilkonstruktion mit kombinierten Werkstoffen - Möglichkeiten und Grenzen am Beispiel verfahrenstechnischer Maschinen, 3. Workshop Konstruktionstechnik, 20./21.09.2001 Rostock-Warnemünde

Schäfer, G.: Elastisch-plastische Auslegung geschwächter Preßverbindungen, Seminar „Preßverbindungen für höchste dynamische

Belastungen“, VDI Bildungswerk, 23./24.10.2001, Chemnitz

Schäfer, G.; Grünendick, T.: Preßverbindungen durch Innenhochdruckfügen, Seminar „Preßverbindungen für höchste dynamische Belastungen“, VDI Bildungswerk, 23./24.10.2001, Chemnitz

Gummersbach, F.: Lärmarm konstruieren XIX. Schalltechnische Informationen unter konstruktiven Gesichtspunkten, Dissertation, TU Clausthal, Wirtschaftsverlag NW Bremerhaven, 2001

Beisheim, N.: Entwicklung eines wissensbasierten Informationssystems zur Durchführung präventiver Sicherheitsanalysen am Beispiel der Konstruktion verfahrenstechnischer Anlagen und Maschinen, Dissertation, TU Clausthal, VDI Verlag 2001

Heimannsfeld, K.: Modellbasierte Anforderungen in der Produkt- und Systementwicklung, Dissertation, TU Clausthal, Shaker Verlag Aachen 2001

Dietz, P.; Grünendick, T.: Bauteilkonstruktion mit kombinierten Werkstoffen - Möglichkeiten und Grenzen am Beispiel verfahrenstechnischer Maschinen. Konferenz-Einzelbericht, Tagung, Würzburg, 18.-19. Okt. 2001, VDI-Berichte, Band 1595 (2001) Seite 121-148 (28 Seiten, 21 Bilder, 15 Quellen), VDI-Verlag, Düsseldorf

Dietz, P.; Wächter, M.: BLK-Projekt - Länderübergreifende Entwicklung und Erprobung integrierter modularer Studienangebote unter Einbeziehung informations- und kommunikationstechnischer Medien am Beispiel der Ingenieurwissenschaften, Abschlußbericht AP4 Internationalisierung, 2001

## Veröffentlichungen 2002

Grünendick, T.: Fester Presssitz durch "hydraulisches Aufweiten". TU Contact, Nr. 11/6, Oktober 2002

Klemp, E.: Unterstützung des Konstrukteurs bei der Gestaltung von Spritzgussbauteilen hergestellt im Rapid Prototyping und Rapid Tooling Verfahren, Dissertation, TU Clausthal, Mai 2002.

Wächter, M.; Hennecke, P.: Leistungspunktsystem für Ingenieure; Workshop Leistungspunktsystem, 2. Juli 2002, Aachen

Otto, St.; Mupende, I.; Dietz, P.: Influence of Hoisting Drum Winding System on the End Plate

Loads, 7th International Design Conference, Dubrovnik, 2002

Düsing, C.: Potentialities of Application of the Emerging Systems Engineering Standard AP233, 7th International Design Conference, Dubrovnik, 2002

Birkholz, H.: Design of Axial Pin Connections for Torque Transmission, 7th International Design Conference, Dubrovnik, 2002

Schäfer, G.; Garzke, M.: INCREASING LOAD CAPACITY OF SPLINES DUE TO DESIGN, 7th International Design Conference, Dubrovnik, 2002

Otto, St.; Mupende I.; Dietz, P.: Influence of the hoisting drum winding system on the end plate loads, 7th International Design Conference, Dubrovnik, 2002

Birkholz, H.: Längsstift-Verbindungen als Alternative zur Passfeder? Seminar „Zahnwellenverbindungen und Pressverbindungen“, VDI Bildungswerk, 27./28.03.2002, Chemnitz

Schäfer, G.: Schadenskunde von Zahnwellen-Verbindungen, Seminar „Zahnwellenverbindungen und Pressverbindungen“, VDI Bildungswerk, 27./28.03.2002, Chemnitz

Schäfer, G.: Betriebs- und Verschleißverhalten von Zahnwellen-Verbindungen, Seminar „Zahnwellenverbindungen und Pressverbindungen“, VDI Bildungswerk, 27./28.03.2002, Chemnitz

Schäfer, G.; Grünendick, T.: Preßverbindungen durch Innenhochdruckfügen, Seminar „Preßverbindungen für höchste dynamische Belastungen“, VDI Bildungswerk, 24./25.09.2002, Chemnitz

Schäfer, G.: Elastisch-plastische Auslegung geschwächter Preßverbindungen, Seminar „Preßverbindungen für höchste dynamische Belastungen“, VDI Bildungswerk, 24./25.09.2002, Chemnitz

Schäfer, G.; Böhm, E.: Methoden zur Innovationsfindung - Wie findet man neue Ideen? Veranstaltungsreihe Innovationstraining für kleinere und mittlere Unternehmen, 7.11.2002, Hildesheim

## Autoren

*Backhaus, Stefan:* Jahrgang 1975, studierte allgemeinen Maschinenbau an der TU Clausthal, seit 1.6.2000 wissenschaftlicher Mitarbeiter am IMW. backhaus@imw.tu-clausthal.de

*Birkholz, Hagen:* Jahrgang 1967, studierte allgemeinen Maschinenbau an der TU Clausthal, seit 1.9.1997 wissenschaftlicher Mitarbeiter am IMW. birkholz@imw.tu-clausthal.de

*Dietz, Peter:* Jahrgang 1939, studierte Maschinenbau an der TH Darmstadt, wissenschaftlicher Assistent am Lehrstuhl für Maschinenelemente und Getriebe der TH Darmstadt, Promotion 1971 über die Berechnung von Seiltrommeln, seit 1974 Leiter der Stabstelle Konstruktionssysteme der Pittler Maschinenfabrik AG, Langen, seit 1977 dort Leiter der Entwicklungsabteilung, seit 1.10.1980 Universitätsprofessor und Institutsdirektor des IMW. dietz@imw.tu-clausthal.de

*Düsing, Carsten:* Jahrgang 1972, studierte Geophysik an der TU Clausthal, seit 1.2.1999 wissenschaftlicher Mitarbeiter am IMW. duesing@imw.tu-clausthal.de

*Goltz, Michael:* Jahrgang 1973, studierte allgemeinen Maschinenbau an der TU Clausthal, seit 1.4.1998 wissenschaftlicher Mitarbeiter am IMW. goltz@imw.tu-clausthal.de

*Grünendick, Torsten:* Jahrgang 1967, studierte Luft- und Raumfahrttechnik an der Universität der Bundeswehr München, von 1993 bis 1996 Fachgruppenleiter bei einem Luftfahrzeugtriebwerks - Instandsetzer in Erding, ab 1996 dort Leiter Qualitätssicherung, seit 1.8.1997 wissenschaftlicher Mitarbeiter am IMW. gruenen@imw.tu-clausthal.de

*Kamel, Nadia:* VDMA European Office. nadia.kamel@mcm.be

*Käferstein, Berthold:* Jahrgang 1973, studierte allgemeinen Maschinenbau an der TU Clausthal, seit 1.5.1998 wissenschaftlicher Mitarbeiter am IMW. kaefer@imw.tu-clausthal.de

*Müller, Dirk:* Jahrgang 1969, studierte Technomathematik an der TU Clausthal, seit 1.1.2000 wissenschaftlicher Mitarbeiter am IMW.

dmueller@imw.tu-clausthal.de

*Mupende, Ilaka:* Jahrgang 1964, studierte allgemeinen Maschinenbau an der Universität von Kinshasa, Demokratische Republik Kongo, Gastwissenschaftler am IMW von Oktober 1996 bis Oktober 2000, seit November 2000 wissenschaftlicher Mitarbeiter am IMW, Promotion im Januar 2001 über das Beanspruchungs- und Verformungsverhaltendes Systems Seiltrommel unter elastischem und teilplastischem Werkstoffverhalten.

mupende@imw.tu-clausthal.de

*Niklaus, Jörg:* Jahrgang 1972, studierte Geologie an der TU Clausthal, seit 1.2.2001 wissenschaftlicher Mitarbeiter am IMW.

niklaus@imw.tu-clausthal.de

*Nsenga Biansompa, Elie:* Jahrgang 1967, studierte allgemeinen Maschinenbau an der Universität von Kinshasa, Demokratische Republik Kongo, seit 01.04.2001 Gastwissenschaftler am IMW.

Nsenga@imw.tu-clausthal.de

*Otto, Steffen:* Jahrgang 1971, studierte allgemeinen Maschinenbau an der TU Clausthal, seit 1.8.1998 wissenschaftlicher Mitarbeiter am IMW. otto@imw.tu-clausthal.de

*Qingsong, Hua:* Jahrgang 1975, studierte allgemeinen Maschinenbau an der TU Liaoning, VR China, seit 01.04.01 Gastwissenschaftler am IMW. mwqh@imw.tu-clausthal.de

*Schäfer, Günter:* Jahrgang 1963, studierte allgemeinen Maschinenbau an der TU Clausthal, seit 1.11.89 wissenschaftlicher Mitarbeiter am IMW, seit 1991 akademischer Rat, Promotion im November 1995 über Verschleiß und Berechnung von Zahnwellen-Verbindungen.

schaefer@imw.tu-clausthal.de

*Schlicht, Matthias:* Jahrgang 1961, studierte Theologie an der Universität Hamburg, Promotion 1991, Studentenpfarrer in Clausthal seit 1997, Lehrauftrag an der TU Clausthal seit 1998.

matthias.schlicht@tu-clausthal.de

*Siemienieć, Adam:* Jahrgang 1929, Professor am Lehrstuhl für Technische Mechanik der Bergakademie Kakau.

ad\_siem@uci.agh.edu.pl

*Sover, Alexandru:* Jahrgang 1975, studierte Maschinenbau an der Nord-Universität BaiaMare/Rumänien, seit 18.08.2002 wissenschaftlicher Mitarbeiter am IMW.  
sover@imw.tu-clausthal.de

*Tawil, Mohamed:* Jahrgang 1969, studierte Maschinenbau an der TU Clausthal, seit 1.11.1997 wissenschaftlicher Mitarbeiter am IMW.  
tawil@imw.tu-clausthal.de

*Trenke, Detlef:* Jahrgang 1969, studierte allgemeinen Maschinenbau an der TU Clausthal, seit 1.10.2000 wissenschaftlicher Mitarbeiter am IMW.  
trenke@imw.tu-clausthal.de

*Wächter, Martina:* Jahrgang 1959, studierte allgemeinen Maschinenbau an der TU Clausthal, seit 1.4.1985 wissenschaftlicher Mitarbeiterin am IMW. waechter@imw.tu-clausthal.de

*Wolny, S.:* Jahrgang 1949, Leiter des Lehrstuhls für Technische Mechanik der Bergakademie Kakau.  
stwolny@uci.agh.edu.pl